

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

A TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS COMO
BASE PARA A REGULAÇÃO DA QUALIDADE
GEOMÉTRICA DO PROCESSO DE USINAGEM CNC

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALBERTO JOSÉ ÁLVARES

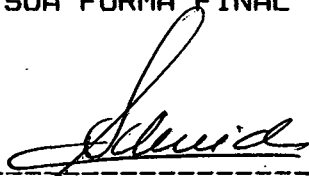
Florianópolis, maio de 1990.

A TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS COMO
BASE PARA A REGULAÇÃO DA QUALIDADE
GEOMÉTRICA DO PROCESSO DE USINAGEM CNC

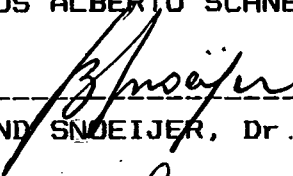
ALBERTO JOSÉ ÁLVARES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO METROLOGIA
E AUTOMAÇÃO APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA.



PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing. - Orientador

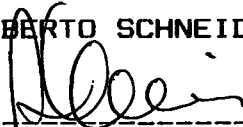


PROF. BEREND SNOEIJER, Dr. Ing. - Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



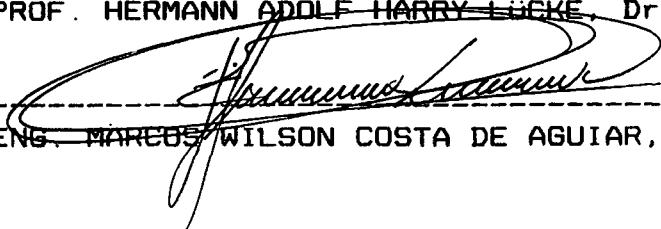
PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing. - Presidente



PROF. ABELARDO ALVES DE QUEIROZ, Ph.D.



PROF. HERMANN ADOLF HARRY LÜCKE, Dr. Ing.



ENG. MARCOS WILSON COSTA DE AGUIAR, M.Sc.

A Lillian

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e ao CERTI, por terem oferecido condições para elaboração deste trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Prof. Carlos Alberto Schneider pela orientação e apoio.

Ao Frank Hisatomi pela codificação e ajuda no desenvolvimento do software.

Ao Luiz Fernando pela elaboração das rotinas gráficas.

À Gladis pela confecção das figuras.

À Bel, Maria Alice, Olga, Rosalva e Rosiane pela digitação deste trabalho e de outros.

Ao Hermann pela revisão do texto.

Aos colegas do CERTI/LABMETRO e amigos da pós que direta ou indiretamente colaboraram para a execução deste trabalho.

Aos meus pais pelo apoio.

À Lillian pela compreensão.

íNDICE

	Pág.
RESUMO	i
ABSTRACT	ii
GLOSSÁRIO	iii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ESTADO TECNOLÓGICO	3
1.2 PROPOSTA DE TRABALHO	3
2. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE DE QUALIDADE DIMENSIONAL	5
2.1 REALIMENTAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	9
2.1.1 Grandezas do Processo de Fabricação	11
a) Monitoração da Vida de Ferramenta	12
b) Medição da Ferramenta na Máquina	14
c) Controle Adaptativo	14
d) Monitoração de Quebra e/ou Desgaste De Ferramenta	16
2.1.2 Grandezas Geométricas Da Peça	18
a) Tecnologia de Medição Interna à Máquina	20
b) Tecnologia de Medição na Máquina	20
c) Tecnologia de Medição Próxima à Máquina	22
d) Tecnologia de Medição Integrada à Máquinas Interligadas	24
2.2 TENDÊNCIA DE SOLUÇÃO PARA O CONTROLE GEOMÉTRICO DA FABRICAÇÃO	24
2.3 INSPEÇÃO EM MALHA FECHADA - CLI -	26
3. ANÁLISE FUNCIONAL DOS ELEMENTOS QUE COMPÕEM UM SISTEMA CLI	29
3.1 DELIMITAÇÃO	29
3.2 ANÁLISE DE FONTES DE ERROS EM PROCESSOS DE USINAGEM CNC	29
3.3 FONTES DE ERROS PASSÍVEIS DE CORREÇÃO	35
3.4 REQUISITOS PARA PROGRAMAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA	38
3.4.1 Requisitos Funcionais Para o Sistema de Programação	38
3.4.2 Métodos de Programação de Interesse	39
3.4.3 Análise da Linguagem APT	40

3.4.4	Comparação das Opções de Identificação Disponíveis em "APT"	43
a)	Correção das Definições Geométricas em Linguagem Tipo APT, na Forma de Declaração em que Foram Definidos	43
b)	Correção das Definições Geométricas em Linguagem tipo APT, Gráficos Interativos ou Não, na Sua Representação Canônica	43
c)	Correção das Definições Geométricas no Arquivo CLFile	44
d)	Correção da Definições Geométricas em Código G - Programa NC Com Comentários na Forma de Relatório	44
3.4.5	Solução Adotada	45
3.5	REQUISITOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO EM AMBIENTE CLI	46
3.5.1	Requisitos Funcionais Para Sistemas de Medição	46
3.5.2	Características Metrológicas e Operacionais Exigidas	48
4.	PROPOSTA DE UM SISTEMA DE INSPEÇÃO PARA REALIMENTAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	51
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE PRODUÇÃO E DOS ERROS PRESENTES	51
4.2	ESTRATÉGIAS E AÇÕES CORRETIVAS	54
4.3	ESTRUTURA DO SISTEMA	55
4.3.1	Análise de Tolerância	56
4.3.2	Análise de Manufatura I (Peças em Início de Produção	58
4.3.3	Análise de Manufatura II (Peças em Ciclo de Produção	59
4.4	CONTEXTO FÍSICO ONDE SE INSERE O SISTEMA ReQual	61
4.5	MODO DE OPERAÇÃO	62
5.	CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS E FUNCIONAIS DOS MÓDULOS DO SISTEMA ReQual	66
5.1	IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS NA AMI E AT ASSOCIADA	66
5.1.1	Aspectos Referentes às Definições Geométricas em EXAPT/APT Relacionados a Medição da Peça	66
5.1.2	Aspectos Referentes à Movimentação de Ferramenta	

Para EXAPT/APT Associados à Identificação dos	
Elementos Geométricos	68
5.1.3 Relacionamento Movimentação de Ferramenta/Protocolo	
de Medição.	70
5.1.4 Definição da Codificação dos Identificadores Para	
o Protocolo de Medição e Para o Programa NC	72
5.2 IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS NA AMII E AT	
ASSOCIADA	75
5.3 ESTRUTURA DA PROGRAMAÇÃO NC PARA O PROCESSO DE MEDIÇÃO.	76
5.4 ESTRUTURA DA PROGRAMAÇÃO NC PARA O PROCESSO DE FABRICAÇÃO	77
5.4.1 Complementação das Estratégias de Programação	
Para a AMII	80
5.5 RELACIONAMENTO ENTRE O PROGRAMA DE USINAGEM E MEDIÇÃO .	82
5.5.1 Escolha do Zero Peça.	82
5.5.2 Relacionamento dos Processos na Fase AMI.	84
5.5.3 Relacionamento dos Processos na Fase AMII	86
5.6 ESTRATÉGIAS E AÇÕES CORRETIVAS NA FASE AMI.	87
5.7 ESTRATÉGIAS E AÇÕES CORRETIVAS NA FASE AMII	90
5.8 ÁREAS DE MEMÓRIA ACESSADAS NO CNC	92
6. ESTRUTURA GERAL DO SISTEMA ReQual	96
6.1 ESTRUTURA BÁSICA E SUAS DIRETRIZES.	96
6.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ATRAVÉS DE DIAGRAMAS DE FLUXO DE	
DADOS (DFD's)	97
6.3 ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO SISTEMA.	103
6.4 DIAGRAMA DE FLUXOS DE TELAS	105
6.5 TELAS DO SISTEMA.	107
7. SIMULAÇÃO DE UM CASO TÍPICO	113
7.1 UNIDADES DO SISTEMA SIMULADO.	113
7.2 PEÇA EXEMPLO.	114
7.3 PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO NC DOS PROCESSOS DE	
FABRICAÇÃO E INSPEÇÃO (MIPP®)	115
7.4 GERAÇÃO DO PROGRAMA NC.	117
7.5 PROTOCOLO DE MEDIÇÃO.	117
7.6 CORREÇÕES EFETUADAS NA AMI.	119
7.7 CORREÇÕES EFETUADAS NA AMII	121
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.	124
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	127

RESUMO

A flexibilidade de assumir distintas ordens de produção é característica especial das células e sistemas flexíveis de manufatura, sendo a flexibilidade um requisito fundamental nos modernos processos de fabricação. Como estágio final de um processo de usinagem, o controle de qualidade dimensional deve ser também flexível e ativo, sendo uma necessidade atual, à sua integração aos sistemas de manufatura a fim de se obter um produto de qualidade melhor e mais homogênea, além de possibilitar um aumento da produtividade do sistema como um todo.

Tecnologia de Medição por Coordenadas utilizando-se de máquinas de medir por coordenadas (CMM), atende plenamente aos requisitos de flexibilidade, considerando o método de medição e a utilização de CNC e computador. A evolução destes equipamentos, especialmente no seu aspecto construtivo, os têm aproximado do processo de fabricação, possibilitando à sua integração física. Por outro lado, a realimentação automática do processo de fabricação baseada no resultado da inspeção dimensional ainda situa-se em estado embrionário de desenvolvimento, estando restrita a centros de pesquisa.

Este trabalho analisa os aspectos e requisitos envolvidos propondo uma metodologia para viabilizar a realimentação automática do processo de fabricação em uma célula flexível de fabricação para peças prismáticas. Com base na inspeção geométrica da peça e em uma análise de fontes de erros é elaborada uma estratégia para diagnosticar as causas de erro geométrico da peça, bem como, as ações corretivas a serem efetuadas para estabelecer/restabelecer a capacidade do processo. Desta forma, realimenta-se o processo de usinagem automaticamente, mantendo-o sob controle. Esta nova filosofia de controle de qualidade é designada por Inspeção em Malha fechada, Constituindo, em uma tendência irreversível, à sua adoção pelos sistemas de Garantia da Qualidade.

ABSTRACT

Flexibility is the main characteristic of Flexible Manufacturing Systems and Flexible Manufacturing Cells and it constitutes a fundamental requirement in modern manufacturing processes. As a final stage of a task or process, the Quality Control should be much more flexible and active, and its integration into the manufacturing systems is a real necessity, to get a product with better and homogeneous quality, besides increasing the productivity of the system as a whole.

The Coordinate Measuring Technology through the utilization of Coordinate Measuring Machines (CMM) satisfies completely these flexibility requirements considering the measuring method and the utilization of CNC and computer. The evolution of these equipments, specially in their constructive aspects, has been bringing them closer to the manufacturing process making their physical integration with the process possible. By the other hand, the automatic feedback of the manufacturing process, based on the dimensional inspection is still in a embrionary stage of development, restricted to research centers.

This work analyses the aspects and concerning requirements, and proposes a methodology to realize the automatic feedback of the manufacturing process in a flexible cell conceived to manufacture prismatic parts. Based on the results of the geometric inspection of the part and an analysis of the geometrical errors of the part, a strategy to diagnosticate the geometrical errors is elaborated, as well as the corrective actions that have to be performed to establish/reestablish the process capability are determined.

This new Quality Control philosophy is designated Closed Loop Inspection, and its adoption in Quality Assurance systems is an irreversible trend.

GLOSSÁRIO

DAS ABREVIATURAS E ACROGRAMAS ADOTADAS NO TEXTO

SIGLA	INGLÊS	PORTUGUÊS
AC	Adaptative Control	controle adaptativo
ACC	Adaptative Control Constraint	controle adaptativo para restrição
ACG	Adaptative Control Geometric	controle adaptativo geométrico
ACD	Adaptative Control Optmization	controle adaptativo para otimização
AGV	Automated Guided Vehicle	veículo automatizado de transporte ou veículo auto- guiado
ASCII	American National Standard Code for Information Interchange, ANSI X3.4-1968	padrão nacional americano de código para intercâmbio de informação
CAD	Computer Aided Design	projeto auxiliado pelo computador
CAM	Computer Aided Manufacturing	fabricação auxiliada pelo computador
CAP	Computer Aided Production	produção auxiliada pelo computador
CAPP	Computer Aided Process Planning	planejamento de processo auxiliado pelo computador
CAQ	Computer Aided Quality	qualidade auxiliada pelo computador

CIM	Computer Integrated Manufacturing	manufatura integrada pelo computador
CLI	Closed Loop Inspection	inspeção em malha fechada
CMM	Coordinate Measuring Machine	máquina de medir por coordenadas
CMMC	Coordinate Controllater	Controlador da CMM
CNC	Computerized numerical Control	Comando Numérico Computadorizado
CtU	Control Unit	unidade de controle
DNC	Distributed Numeric Control	comando numérico direto. Também designado por alguns autores como comando numérico distribuído
EG		Elemento Geométrico
ES	Expert Systems	sistemas especialistas
FMC	Flexible Manufacturing Cell	célula flexível de manufatura
FMS	Flexible Manufacturing System	sistema flexível de manufatura
IIC	Integrated Inspection Cell	célula de inspeção integrada
IpU	Inspection Unit	unidade de inspeção
LAN	Local Area Network	rede local de comunicação
MfU	Manufacturing Unit	unidade de fabricação
MgU	Management Unit	unidade de gerenciamento
MsU	Measurement Unit	unidade de medição

MIPP ²	Manufacturing and Inspection Process Programing Planning	planejamento da programação NC dos processos de fabricação e de inspeção
MT	Machine Tool	máquina-ferramenta
NC	Numerical Control	comando numérico
OS	Operating System	sistema operacional
PLC	Programable Logical Controller	controlador lógico programável
QA	Quality Assurance	garantia da qualidade
QC	Quality Control	controle de qualidade
SPC	Statistical Process Control	controle estatístico de processo
THU	Transport and Handling Unit	unidade de manipulação e transporte

1. INTRODUÇÃO

O atual estágio de desenvolvimento dos sistemas de manufatura, especialmente as células/sistemas flexíveis de manufatura (FMC/FMS), requerem do controle de qualidade geométrico/dimensional o mesmo grau de rapidez, confiabilidade, automação e flexibilidade. A integração do controle de qualidade no processo é extremamente desejável e necessária, a fim de propiciar uma maior produtividade e um melhor nível de qualidade para o produto processado ao menor custo possível /1,2/. Esta integração dá-se em dois níveis:

- a nível físico: trata da conexão entre os diversos tipos de hardware e software que compõem o sistema;
- a nível lógico: trata do compartilhamento/realimentação das informações obtidas pelo controle de qualidade, nas diversas malhas de qualidade existentes nos vários setores da organização (fig. 1.1).

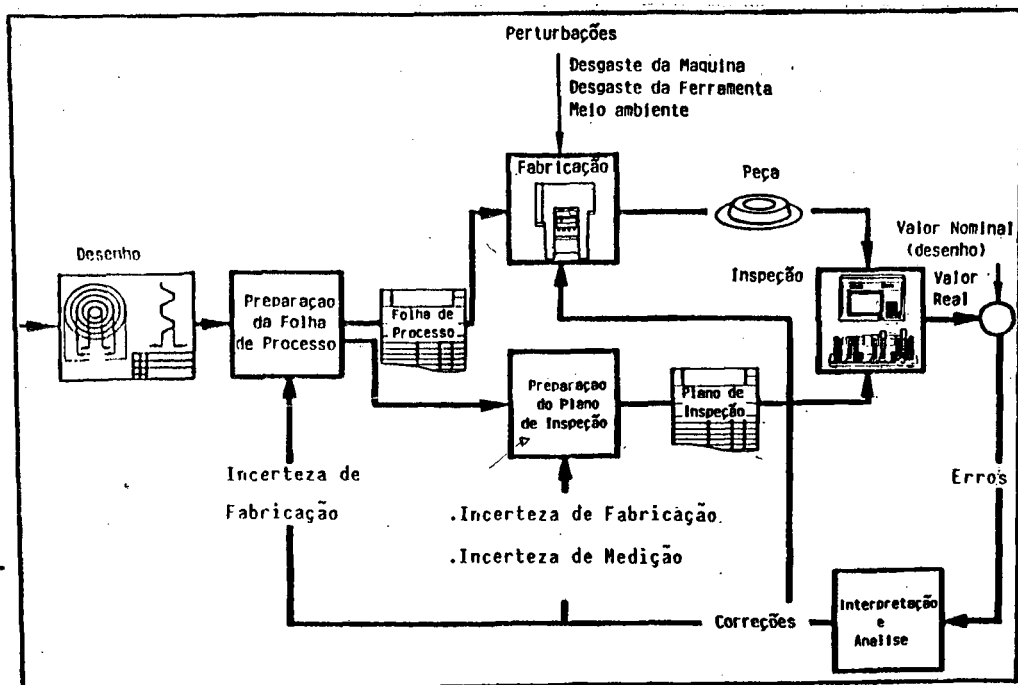


Figura 1.1 – Malhas de controle de qualidade entre os níveis de planejamento e operacional/processo /7/

Atualmente, a integração a nível físico já é realidade /1,2,3,4/. A integração a nível lógico, ainda, está em fase embrionária /5,6,7/.

Com o surgimento da filosofia do controle de qualidade (QC) integrado à produção, o novo desafio do QC (fig. 1.2) passou a ser não apenas a detecção de defeitos nas peças acabadas ou semi-acabadas, mas também a sua prevenção com o objetivo de se atingir o almejado "zero defeito" /7/. O requisito básico, para se conseguir a prevenção de defeitos é ter um profundo conhecimento e domínio dos processos e métodos empregados na fabricação. A fim de se atingir este objetivo, o controle de qualidade deve se responsabilizar pela coleta dos dados necessários em todos os setores da produção, bem como a sua análise e realimentação, em malha fechada, para os demais níveis do sistema de manufatura, desde o processo até o planejamento.

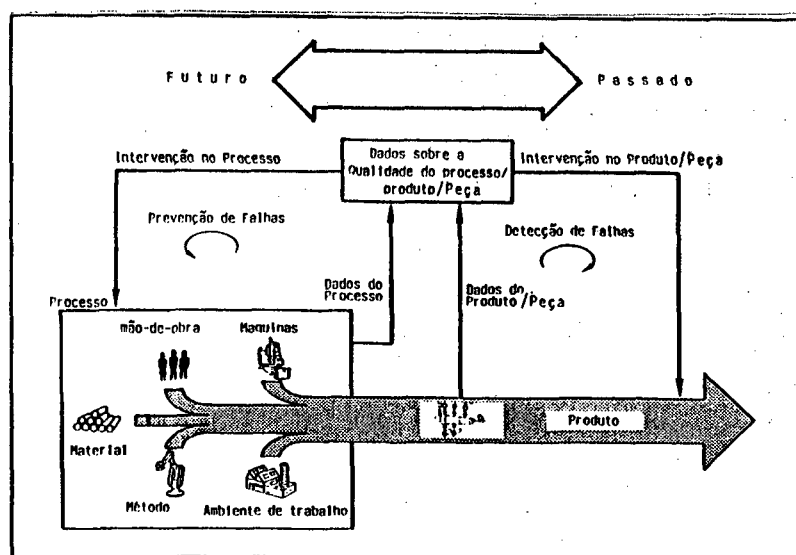


Figura 1.2 - Nova atribuição do controle de qualidade /7/

A nível de chão de fábrica a realimentação baseada em dados de inspeção geométrica é chamada de inspeção em malha fechada ("Closed Loop Inspection" - CLI), sendo idealmente modelado por duas etapas: Análise de Tolerância e Análise de Manufatura /5/.

A adoção de estratégias de controle, realimentando o processo de fabricação levará a ganhos reais de produtividade, pois estima-se /8/ um aumento da ordem de até 30% na produtividade com a prevenção de quebra de ferramenta e de até 40% com um controle de desgaste

de ferramenta. Além disso, cerca de 25% dos erros presentes na primeira peça, produzidas com tecnologia CNC, são devido às definições geométricas inconsistentes /9/, só detectáveis após a usinagem da peça, por causa da sua pequena magnitude.

1.1 ESTADO TECNOLÓGICO

Devido ao estado incipiente da tecnologia de integração do controle de qualidade no processo de fabricação, não existe muita literatura sobre o assunto, apesar do tema, atualmente, ser objeto de programas de pesquisa de diversas instituições /3,5,10,11/. Estas pesquisas começaram no final dos anos 80, em algumas destas instituições, e até o momento não se têm notícia da implantação de um sistema que a utilize.

A idéia não é recente /12/, sendo derivada do conceito de controle adaptativo /13/. Contudo, até metade da década de 80 havia muito ceticismo quanto a viabilidade do desenvolvimento de um sistema CLI /6,14/ devido, principalmente, ao problema de interpretação do resultados de medição associado à identificação das fontes de erros e não propriamente às dificuldades técnicas de software/hardware /6/.

Recentemente, as atenções voltaram-se para o desenvolvimento de sistemas que incorporem esta filosofia, levadas, principalmente, pela limitação dos atuais sistemas de controle de qualidade que não atendem as exigências dos modernos sistemas de manufatura.

1.2 PROPOSTA DE TRABALHO

As motivações que levaram ao desenvolvimento deste trabalho foram a atuação do LADMETRO no campo da moderna tecnologia de medição por coordenadas e a oportunidade de introduzir, com vantagens, esta tecnologia de medição no desenvolvimento de FMC/FMS's. Esta tendência mundial é irreversível pois, para se atingir plenamente o conceito CIM, este será o caminho que o controle de qualidade deverá trilhar /7,15,16/.

A proposta de trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para estabelecer as condições tecnológicas para a integração racional, a nível lógico, de uma Máquina de Medir por Coordenadas (CMM) em uma célula de fabricação, dotada de uma ou mais máquinas-ferramenta CNC. O intuito é de medir as peças processadas e realizar a realimentação do processo de usinagem, quando necessário, para garantir a produção dentro de estreitas tolerâncias geométricas. Por meio de medições de peças "cabeça de série"/"try-out" ou de amostras de produção, identificar desajustes, desgaste de ferramenta e/ou outras causas de erros. Através de metodologia, preferencialmente universal para usinagem por remoção de cavaco com ferramenta de geometria definida, estabelecer automaticamente instruções para ajuste do processo na máquina-ferramenta CNC.

Nos capítulos 2 e 3, é feita uma análise minuciosa de todos os requisitos necessários para o desenvolvimento de uma filosofia CLI. Esta análise possibilitará obter uma noção clara do problema, bem como do caráter multidisciplinar envolvido. Como resultado desta análise, apresentar-se-á a concepção do sistema desenvolvido (cap. 4), assim como, as características operacionais e tecnológicas presentes (cap. 5). A implementação do sistema, a nível de software, é apresentada de forma estruturada e documentada (cap. 6), o que possibilitará a sua evolução futura. Na sequência (cap. 7), é apresentado a simulação de um caso e tecidas algumas

considerações sobre o sistema. Para finalizar (cap. 8), são mostradas as conclusões e propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros que complementem o atual.

2. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE DE QUALIDADE DIMENSIONAL

A automação flexível da manufatura é a resposta para a indústria metal-mecânica, a fim de viabilizar a produção de pequenos e médios lotes a baixo custo, obtendo-se alta produtividade e qualidade do produto possibilitando, ainda, rápidas mudanças no produto quando requerido pelo mercado. A fim de atingir estes objetivos surgiram as células/sistemas flexíveis de manufatura (FMC/FMS), que no passado tratavam, prioritariamente, dos aspectos referentes às unidades de manipulação/transporte (THU) de peças e materiais, às unidades de fabricação (MfU) e à unidade de gerenciamento (MgU), deixando de fora o controle de qualidade representado pelas unidades de inspeção (IpU).

Contudo, o desenvolvimento tecnológico no campo da inspeção automática e controle do produto, na década de 80, tornou a tarefa/operação de inspeção geométrica/dimensional tão flexível e automática quanto as máquinas-ferramenta usadas na fabricação das peças /1/, vislumbrando um novo horizonte para o controle de qualidade e possibilitando a sua incorporação aos sistemas de produção (fig. 2.1). Surgiu assim, a integração a nível físico transferindo o controle de qualidade das "Salas de Metrologia" para o chão de fábrica, utilizando-se de tecnologia de medição próxima à unidade de fabricação ou de tecnologia de medição integrada à unidades de fabricação interligadas /1/.

Paralelamente a esses desenvolvimentos tecnológicos, também transformava-se a filosofia do controle de qualidade, a fim de suprir as necessidades do sistema de garantia da qualidade que até o momento apenas detectava o status da peça usinada. Assim, o objetivo da inspeção geométrica tornou-se mais ambicioso e, além da detecção de falhas, passou a ser perseguida a sua prevenção e subsequente realimentação para o processo de fabricação (fig. 2.2),

surgindo a integração a nível lógico com realimentação automática do processo baseada em dados de inspeção geométrica.

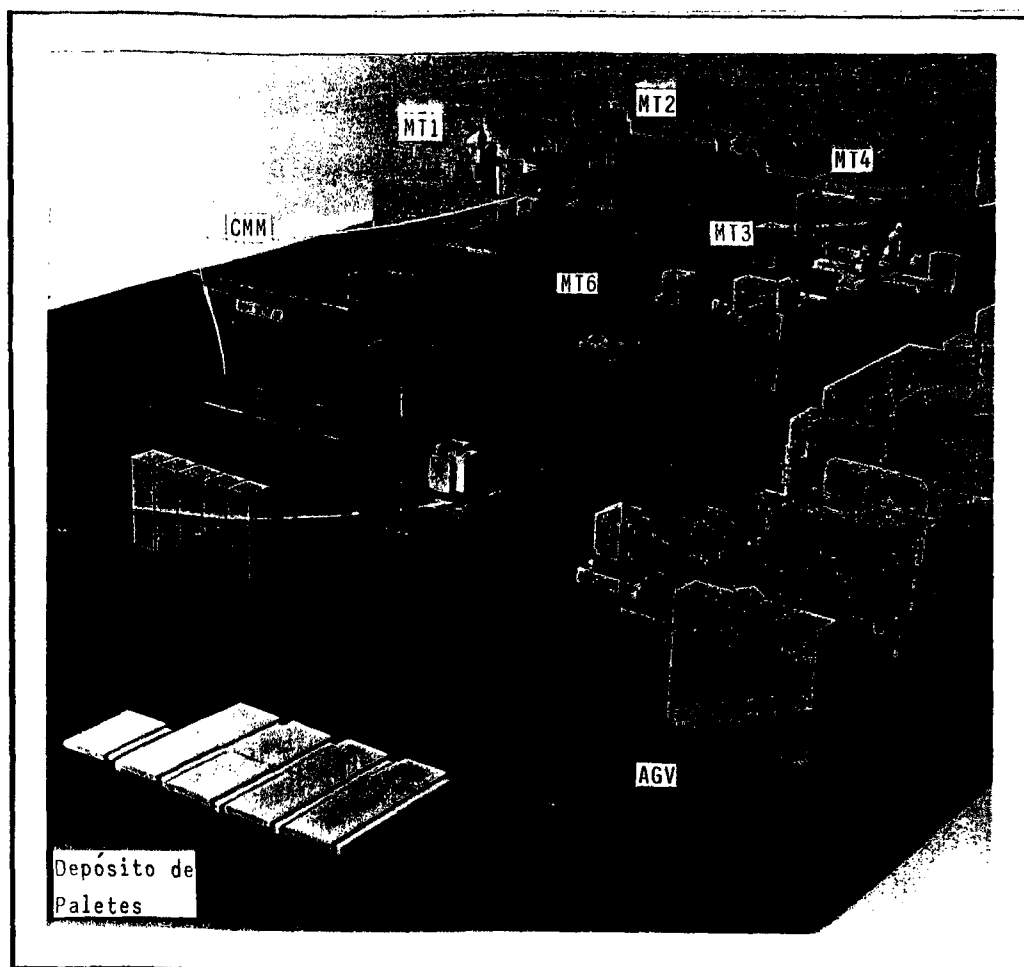


Figura 2.1 - Integração a nível físico do controle de qualidade em FMC /7/

A integração a nível físico, foi o ponto de partida para concepção dos atuais sistemas de controle de qualidade integrados, sendo designados de: células de inspeção integrada, estações de inspeção ou sistemas de inspeção flexível /1,2,3/. Nestas, inspeciona-se as peças entregues por um sistema de movimentação de materiais, verificando característicos de qualidade dimensional, de posição e microgeometria (rugosidade superficial). São localizadas no chão de fábrica, por vezes, em ambiente climatizado (temperatura-sobrepresão), próximo/junto ao processo de fabricação, sendo constituídas por máquinas de medir por coordenadas (CMM) e/ou

sistemas de medição multipontos (medição diferencial), medidor de rugosidade e unidades de transporte e manipulação de peças. Sistemas mais simples realizam apenas a verificação dimensional e de posição, sendo normalmente constituídos por uma CMM "encapsulada" (fig. 2.1) em uma cabine climatizada /4/, sendo sua interligação feita por AGV ("Automatic Guided Vehicle") ou por um sistema de movimentação de paletes /17/.

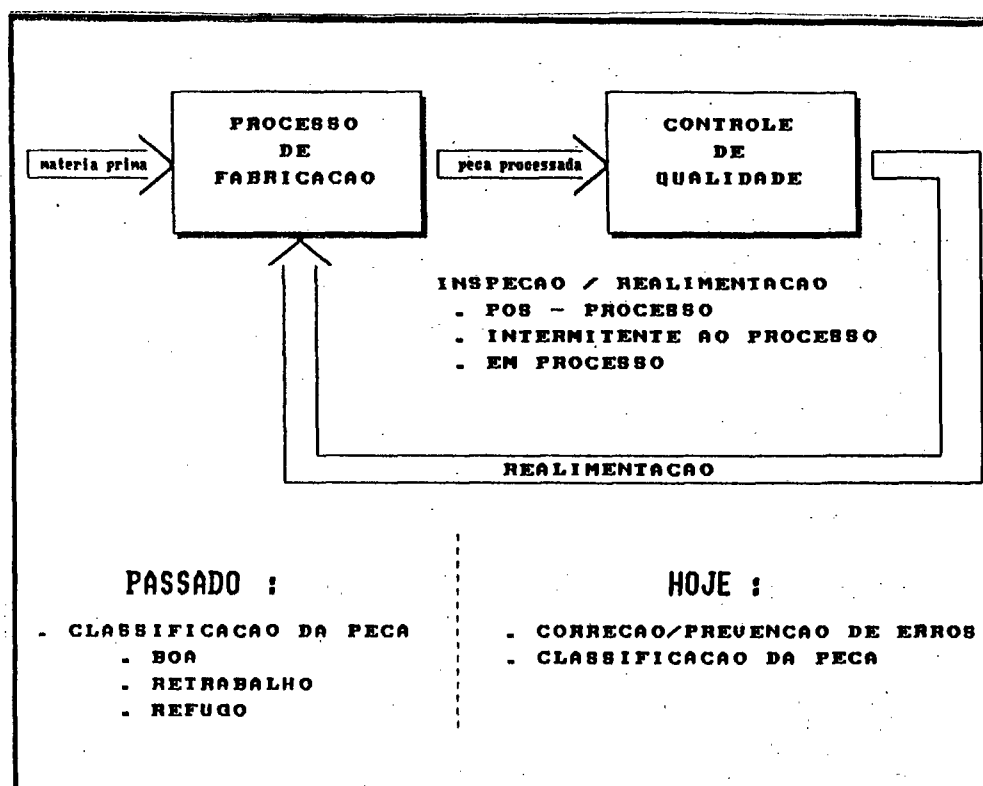


Figura 2.2 - Integração a nível lógico do controle de qualidade

Analogamente ao tipo de sistemas de fabricação utilizado /6/, onde existe um comprometimento entre tamanho do lote e variedade de peças (fig. 2.3), nas unidades de inspeção ocorre o mesmo para seleção de um equipamento/unidade de medição (fig. 2.4).

Quando utiliza-se FMC/FMS, onde têm-se médios/pequenos lotes de produção com uma considerável variedade de peças, é recomendável a utilização de célula de inspeção integrada, a fim de atender a demanda requerida, figuras 2.3 e 2.4.

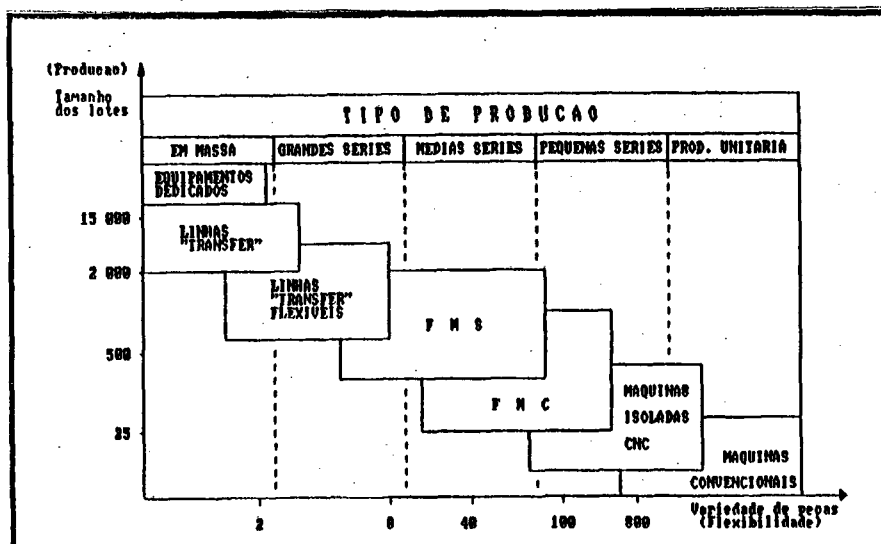


Figura 2.3 - Tecnologia de fabricação /1/

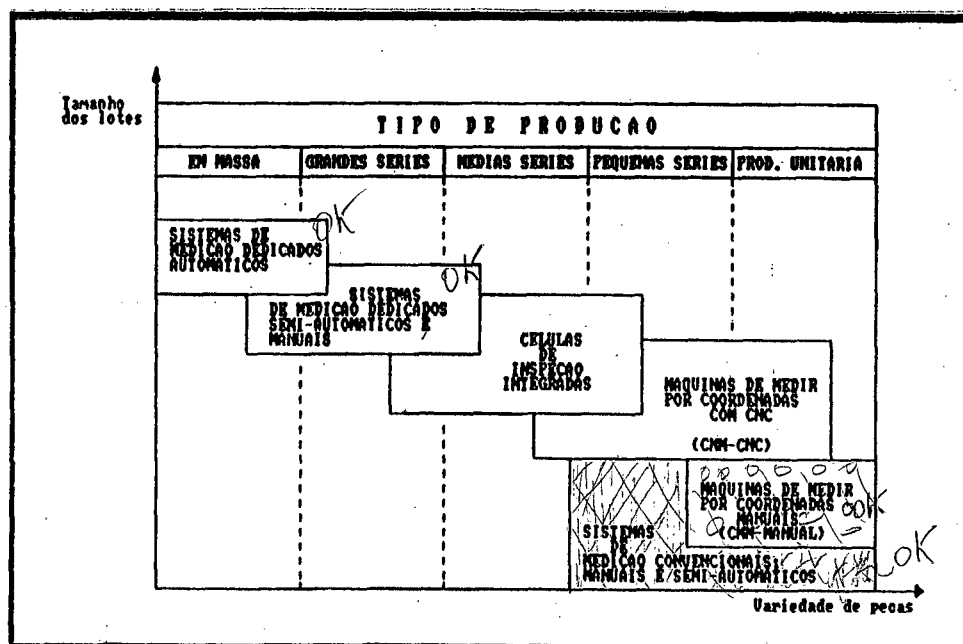


Figura 2.4 - Tecnologia de inspeção /1/

Técnicas de inspeção tradicionais, que detectam defeitos apenas depois que eles tenham ocorrido, não são mais aceitáveis para suprir as necessidades da garantia da qualidade em células e sistemas flexíveis de manufatura. Sistemas baseados em célula de inspeção integrada têm a capacidade de realizar um controle em "tempo real" sobre a qualidade gerada pela "linha". Estas estações determinam apenas se a peça está dentro/fora das tolerâncias especificadas, sem a realimentação automática do processo de

fabricação. Fornecem informações sobre o status da peça (boa, refugo ou retrabalho) e utilizam-se de técnicas para controle estatístico de processo (SPC), deixando a análise dos dados a cargo do operador. Ajudam assim a localizar fontes de erros, bem como, propiciam a avaliação da eficiência global do sistema /2/. Atualmente, o alvo das pesquisas é obter uma realimentação automática de correções de erros para as unidades de fabricação, a fim de garantir a produção de peças conforme as especificações de projeto.

A adoção preferencial por CMM é devido ao alto grau de automação e flexibilidade disponível, igualando-as nestes requisitos às máquinas-ferramenta CNC. CMM's são empregadas basicamente de três maneiras /13/:

- na inspeção geométrica da primeira peça de um lote de produção, para em seguida efetuar os ajustes necessários, de forma manual, na máquina-ferramenta CNC;
- entre duas unidades de fabricação, a fim de inspecionar todas as peças produzidas pela primeira unidade de fabricação (inspeção 100%) só liberando peças boas para serem processadas pela segunda unidade;
- integrada ao sistema de fabricação por meio de uma unidade de movimentação automatizada.

Cerca de 3% das CMM são "encapsuladas" (fig. 2.1) estando integradas a nível físico em sistemas de fabricação. Cinco por cento estão localizadas em células de inspeção integrada e 92% em salas Metrológicas /17/, tendo assim, um grande campo de aplicações, ainda pouco explorado.

2.1 REALIMENTAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

A realimentação do processo de fabricação é baseada na monitoração de grandezas relevantes (fig. 2.5), utilizando-se dos mais variados tipos de unidades de medição e de um apropriado sistema de realimentação, o qual analisa os dados obtidos e realiza as devidas correções sobre os parâmetros do processo.

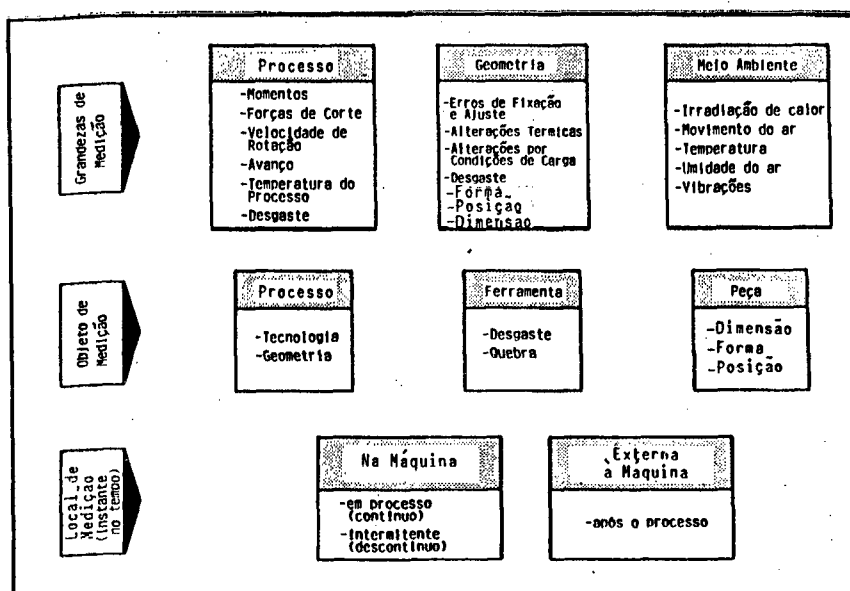


Figura 2.5 - Grandezas relevantes para estratégias de realimentação para controle de processos

Idealmente, esta realimentação pode ser feita a partir da medição de grandezas do processo propriamente ditos (forças, vibração, desgaste de ferramenta e outros) e/ou de grandezas geométricas da peça (inspeção geométrica), medidos simultaneamente à fabricação (em processo) com o objetivo de produzir apenas peças boas, obtendo refugo zero [18,19]. Se a medição em processo não for possível, como ocorre normalmente com a inspeção geométrica, a peça deve ser inspecionada imediatamente após a sua fabricação e, baseado nos dados de medição e em uma adequada estratégia de realimentação, ações corretivas são efetuadas sobre o processo (fig. 2.6).

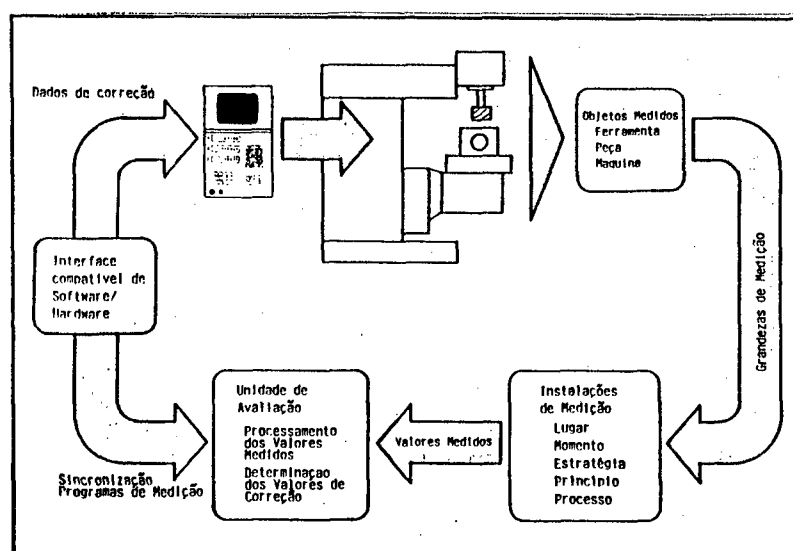


Figura 2.6 - Fluxo de dados na correção automática do processo

Assim, a realimentação para controlar e melhorar a qualidade do processo e/ou produto pode ser baseada em dois grupos de grandezas passíveis de monitoração (fig. 2.7):

- grandezas do processo de fabricação;
- grandezas geométricas da peça.

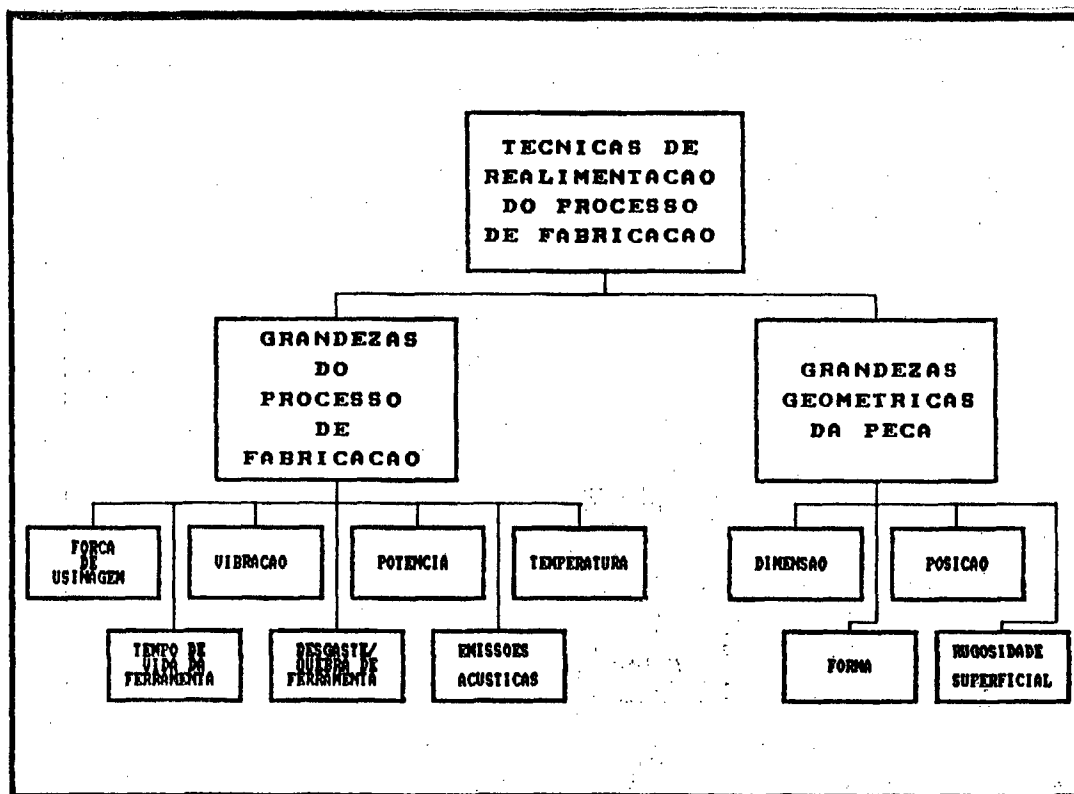


Figura 2.7 - Estrutura para técnicas de realimentação do processo de fabricação

2.1.1 Grandezas Do Processo De Fabricação

Neste caso a medição ocorre em processo e a realimentação em tempo real. Utiliza-se de diversas tecnologias de medição e de várias grandezas do processo, bem como, de várias estratégias de realimentação e ações corretivas. A figura 2.8 apresenta os diferentes modos para se obter a realimentação, a fim de otimizar e manter o processo de fabricação dentro dos limites especificados, os quais serão abordados a seguir:

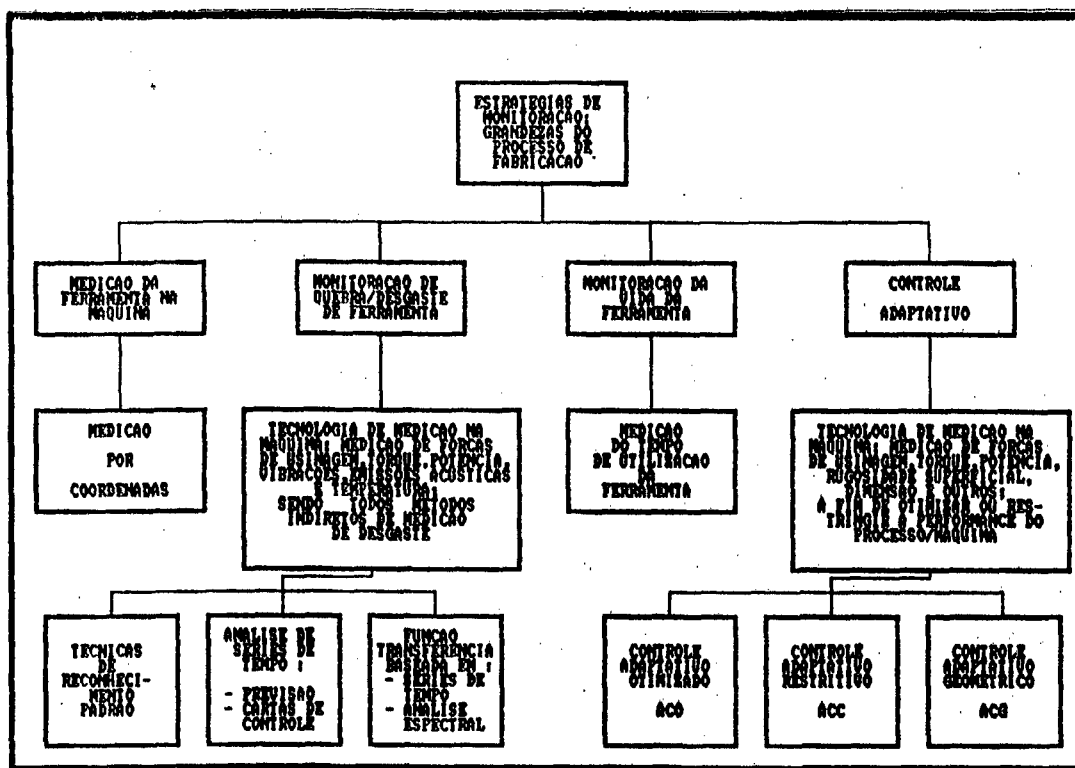


Figura 2.8 - Estratégias de monitoração/realimentação baseada em grandezas do processo de fabricação

a) Monitoração Da Vida De Ferramenta

Informações sobre expectativa de vida de ferramenta sob diferentes condições de usinagem são geralmente disponíveis na forma de tabelas compiladas pelos usuários ou fornecidas pelos fabricantes de ferramentas de corte /19,20/. Por outro lado, os comandos numéricos modernos /21/ já encarregam-se da monitoração da vida de ferramenta, pela medição do tempo de usinagem por ferramenta e comparação do resultado com um valor pré-estabelecido, por exemplo, 15min para determinadas condições tecnológicas de usinagem, estabelecendo assim o seu fim de vida. Quando o fim de vida de uma determinada ferramenta é atingido, o sistema interrompe a usinagem e providência a troca de ferramenta por outra já especificada anteriormente e disponível no magazine de ferramentas (fig. 2.9).

Existem restrições quanto a utilização desta estratégia /15/, pois a vida útil de idênticas ferramentas sob idênticas

condições de corte variam consideravelmente, impondo assim, uma política de troca de ferramenta forçosamente conservadora. Analisando-se a figura 2.10, constata-se que para prevenir um desgaste excessivo durante a usinagem da peça, o ponto de troca de ferramenta deve mover-se para o lado esquerdo da curva de distribuição da vida de ferramenta, devido à variabilidade do desgaste de ferramenta.

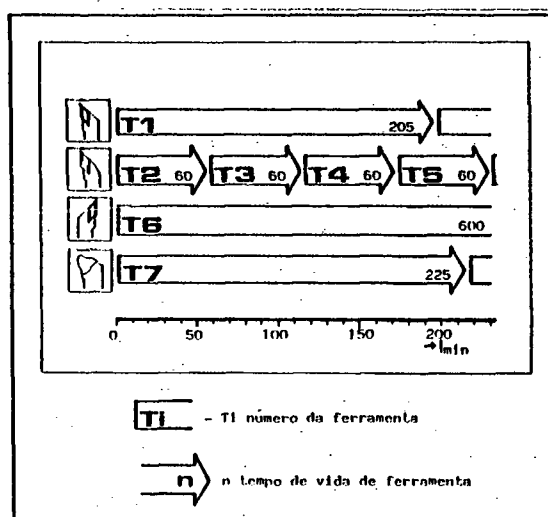


Figura 2.9 - Monitoração da vida de ferramenta /21/

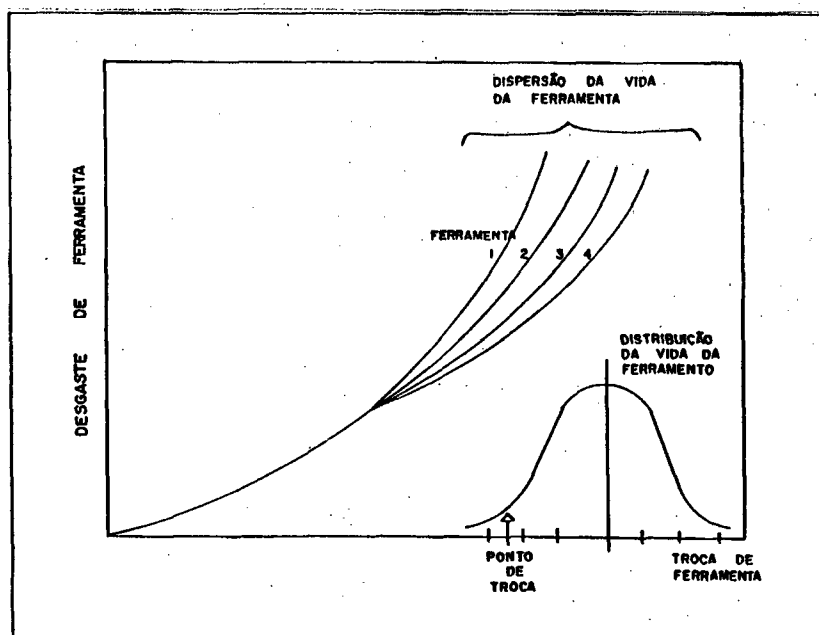


Figura 2.10 - Variabilidade do desgaste de ferramenta - monitoração da vida de ferramenta /16/

Esta política previne um desgaste excessivo durante a usinagem mas, também, a maioria das trocas de ferramenta ocorre antes do seu fim de vida, tendo um custo considerável quando comparada a uma real estratégia de monitoração do desgaste de ferramenta. Outro problema associado é da impossibilidade de prever a falha da ferramenta, o que é essencial para a usinagem sem assistência de operador.

b) Medição Da Ferramenta Na Máquina

No "pre-set" tradicional, as ferramentas são medidas/ajustadas antes do uso na máquina, por um equipamento óptico, mecânico ou computadorizado. Subsequentemente, os dados são transferidos para o controle da máquina via DNC (comando numérico direto) ou manualmente. Uma sequência de eventos que consome muito tempo, propenso a falhas e insatisfatório quanto à precisão obtida /21,22/, pois a posição real do gume de corte da ferramenta a ser medido pode ter embutido um erro considerável, por este não representar fielmente as condições de fixação do cone ISO na árvore da máquina.

Assim, a medição da ferramenta na máquina, utilizando-se de tecnologia de medição por coordenadas /23/, é uma solução bastante atraente. Contudo, quando se deseja manufatura sem assistência de operador sua implementação é enormemente dificultada, pois os sistemas comerciais existentes necessitam da atenção do operador, sendo mais apropriada a sua utilização em sistemas que apresentem uma grande interação com o operador.

c) Controle Adaptativo

O controle adaptativo (AC) tem sido aplicado há cerca de 20 anos para o controle da performance de máquinas-ferramenta, contudo, a sua aplicação tem experimentado dificuldades. Isto ocorre devido ao grande número de variáveis intrínsecas ao processo que possuem um comportamento um tanto quanto imprevisível, tornando difícil a utilização de um sistema de controle para aumentar ou otimizar o desempenho do processo.

Dentro deste campo de utilização ainda não existe, na maioria dos casos, uma utilização por parte dos fabricantes de máquinas-ferramenta da tecnologia AC /24/, apesar dos diversos sistemas comerciais disponíveis /15,24/. O seu alto custo associado a sua baixa confiabilidade e necessidade de ajustes frequentes, dificulta a sua utilização a nível industrial. Além disso, a tecnologia de sensores ainda deixa a desejar, devido à sua inadequada resposta dinâmica /15,24,25/.

Não há ainda consenso quanto a classificação de AC /13,24/, principalmente, quando aplicado ao controle de operações de usinagem. Em termos gerais pode-se classificá-lo como (fig. 2.8): controle adaptativo para restrição (ACC) e controle adaptativo para otimização (ACO).

ACC é definido como um sistema de controle no qual o aumento da produtividade da máquina é obtido através da medição em processo e pelo uso de valores limites para parâmetros da máquina como torque, forças, potência ou deflexão da árvore.

ACO é um sistema de controle no qual a ótima produtividade da máquina é obtida baseando-se em um índice de performance, sendo normalmente uma função econômica como custo mínimo de usinagem ou máximo volume de produção, ou um característico de qualidade da peça. Utiliza-se de medição em processo e do ajuste dos parâmetros de operação de acordo com a estratégia adotada.

Um terceiro grupo de classificação pode ser adotado, são chamados de controle adaptativo geométrico (ACG) /13,26/. Visam aqueles sistemas de controle que monitorem o processo de forma indireta, baseando-se na medição em processo de característicos de qualidade da peça (normalmente dimensão) e ajustando os parâmetros de operação (avanço, velocidade de corte e/ou profundidade) para manter e/ou melhorar a precisão dimensional e/ou de forma especificada.

ACC e ACO baseiam-se, normalmente na monitoração de forças de usinagem, potência e torque, e em uma adequada estratégia de

realimentação, a fim de variar a velocidade de corte e/ou o avanço /13,24/. As referências /13,15,24,27,28/ apresentam exemplos de ACO e ACC desenvolvidos, sendo que a maioria refere-se a sistemas ACC.

ACG, atualmente, baseia-se na monitoração de uma dimensão característica da peça usinada. é utilizado para processos de torneamento /26,29/, onde a medição é realizada por um sistema de medição sem contato baseado em opto-eletrônica; e para retífica /13,15,30,31/, onde a medição é realizada por apalpadores eletromecânicos, sendo esta a aplicação mais comum de ACG. Em ambos os casos um sistema de controle processa o sinal gerado pelos sistemas de medição e controla a movimentação da ferramenta automaticamente (em tempo real) mandando sinais apropriados para o controle da máquina, a fim de corrigir o erro detectado.

A utilização de AC tende a aumentar com o desenvolvimento de novos sistemas que tenham uma maior confiabilidade, robustez e um menor custo além, é claro, da necessidade dos FMC/FMS em minimizar a intervenção humana /32,33/ e de possuir mecanismos que possibilitem o aumento da produtividade, sendo a utilização de AC uma solução a nível de processo.

d) Monitoração De Quebra E/Ou Desgaste De Ferramenta

Neste trabalho, a monitoração de desgaste/quebra de ferramenta não será considerada como um tipo de AC, pois há muita controvérsia a respeito /13,24,25/.

Diversos métodos de monitoração de desgaste e/ou quebra de ferramenta têm sido desenvolvidos /13,15/, podendo classificá-los em métodos direto e indireto. O primeiro caso, ainda está confinado a laboratórios, enquanto que o segundo já apresenta aplicações comerciais, sendo disponíveis em algumas sofisticadas máquinas-ferramenta CNC /20/. O método indireto baseia-se, normalmente, na medição de uma ou mais das seguintes grandezas: forças de usinagem (corte e avanço), torque, potência, temperatura, resistência elétrica entre a

ferramenta e a peça, vibração e emissões acústicas (fig. 2.8). Associa a sua variação ao desgaste/quebra de ferramenta, por meio de um adequado tratamento de sinais (filtragem, amplificação, retificação e outros) e posterior análise por: um software/algoritmo /34/, composto por 2 modelos que juntos descrevem o processo de forma generalizada (o modelo determinístico, "função transferência", descreve a dinâmica do processo e um modelo estocástico, que descreve as perturbações /ruídos do processo); ou por hardware dedicado /19,25,35, 36,37/, que compara os valores medidos com valores pré-estabelecidos indicando o estado da ferramenta.

O modelamento matemático utiliza técnicas de reconhecimento padrão /15,19,38,39/, ou análise de séries de tempo (modelos ARIMA) aplicados na previsão de valores futuros /34/, ou na forma de função transferência no domínio do tempo ou da frequência (análise espectral), a fim de determinar o limite de desgaste ou quebra de ferramenta.

Com a utilização de "sensores de desgaste", a ferramenta é trocada apenas quando o desgaste atinge o nível especificado (fig. 2.11). Esta técnica propicia uma vida maior para cada ferramenta antes de sugerir uma troca quando comparado à monitoração do tempo de vida da ferramenta (fig. 2.8), pois nesta última por não se monitorar propriamente o desgaste e sim o tempo de utilização da ferramenta, não é levado em consideração fatores de natureza aleatória (variações das propriedades mecânicas do material da peça, condições de microdureza distintas e outros), que aumentam a dispersão do desgaste de ferramenta /19/.

Atualmente, os sistemas que mais se destacam e que obtêm os melhores resultados, nesta aplicação, são os baseados na medição de forças de corte, por meio de sensores piezoelétricos ou extensômetros de resistência, sendo que os piezoelétricos apresentam melhores resultados /19,20/. Os sensores para detecção de vibrações e ruídos associados ao desgaste de ferramenta também apresentam bons resultados

/25,36/. A maioria das aplicações são voltadas para o processo de torneamento/corte contínuo.

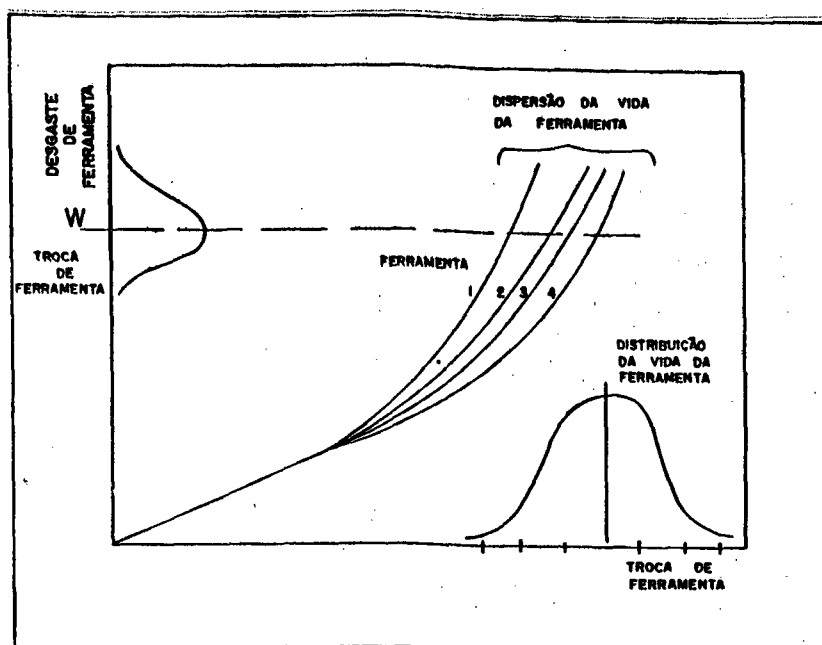


Figura 2.11 - Variabilidade na detecção de desgaste de ferramenta - monitoração do desgaste /12/

A fim de possibilitar a fabricação sem supervisão de operador e, também para aumentar a qualidade do produto e a produtividade da máquina, é essencial a utilização da monitoração do desgaste de ferramenta, bem como de quebra. A quebra de ferramenta causa danos não apenas à ferramenta, mas à peça e à própria máquina-ferramenta. Já um desgaste de ferramenta acima do tolerável, de acordo com algum critério de fim de vida de ferramenta adotado, provoca um acabamento superficial ruim, erros dimensionais e o aumento das forças de usinagem, da potência e do torque, entre outros /40/, prejudicando sensivelmente a produtividade do processo e a qualidade da peça processada.

2.1.2 Grandezas Geométricas Da Peça

Neste caso, a realimentação automática e/ou manual para o processo é baseada no resultado de medição geométrica, o qual é devidamente analisado por uma adequada estratégia (fig. 2.12). As possíveis

correções são efetuadas sobre as grandezas geométricas e dados de ferramenta que definem a movimentação da ferramenta, ou seja, o tratamento ocorre sobre a definição geométrica da peça e sobre os dados de ferramenta.

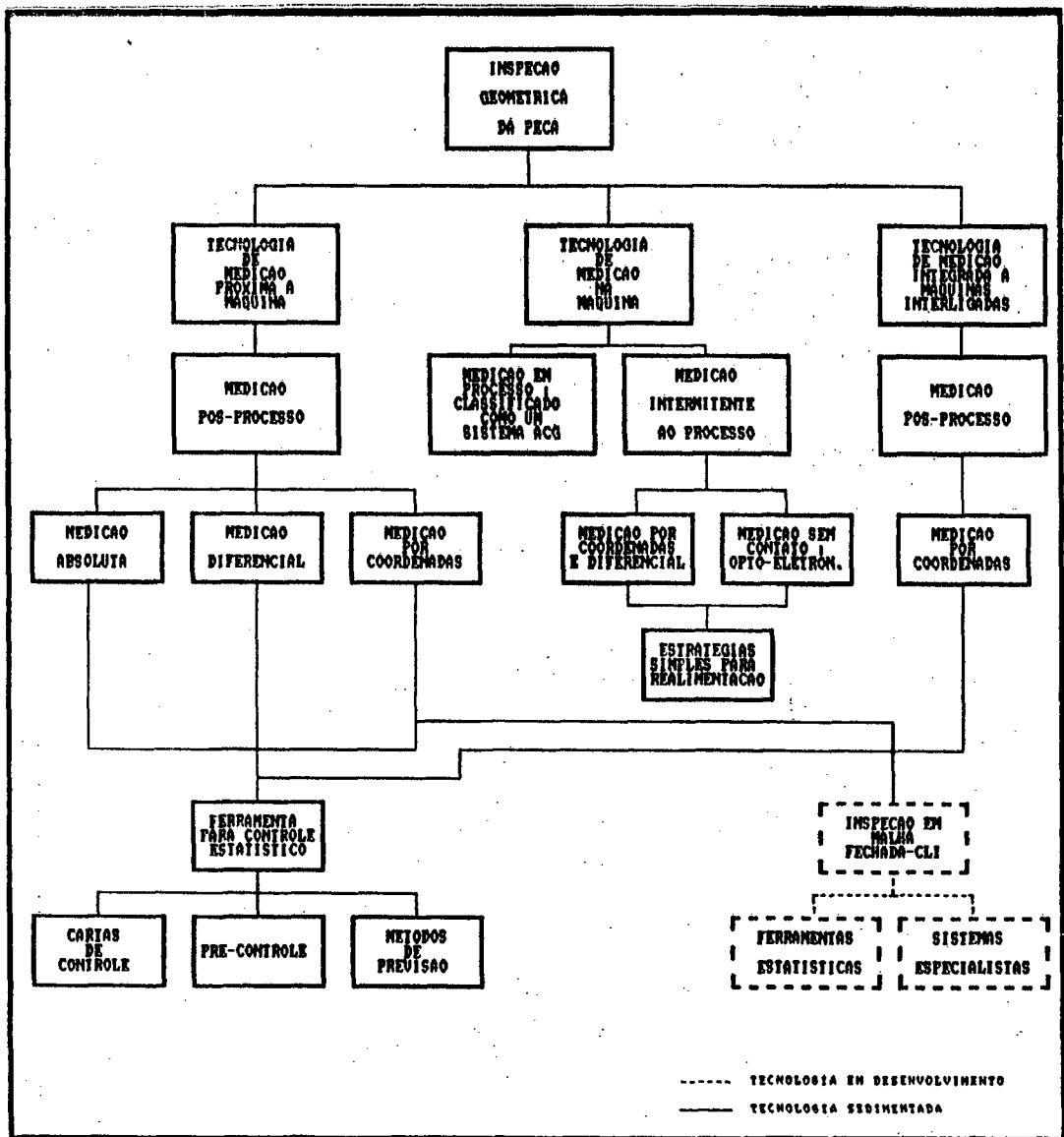


Figura 2.12 – Estratégias de realimentação baseada em dados da inspeção geométrica

A seguir serão apresentadas as tecnologias de medição voltadas para controle de qualidade, as estratégias associadas para realimentar o processo, bem como da tecnologia de medição/inspeção no contexto da manufatura (fig. 2.13). Esta classificação é realizada em função da localização e atuação temporal da IPU em relação à MfU:

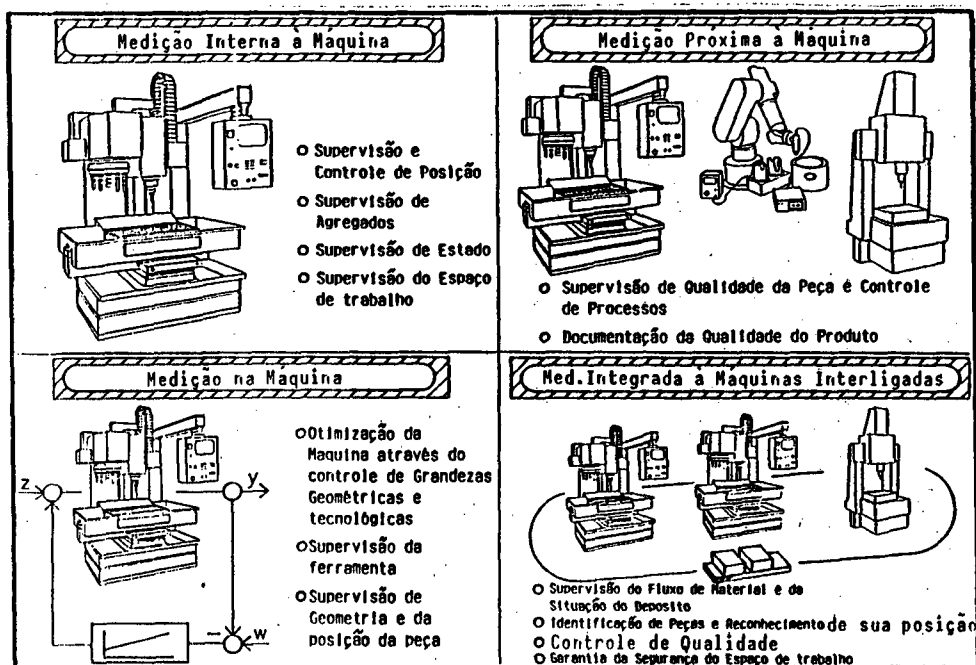


Figura 2.13 - Tecnologias de medição utilizadas /7/

a) Tecnologia De Medição Interna à Máquina

É um requisito básico para viabilizar a operação automática de qualquer máquina /7/. Possibilita a monitoração e o controle do posicionamento da árvore, mesa, etc.; monitora status, bem como o espaço de trabalho, entre outros. Esta tecnologia de medição não é utilizada para a inspeção geométrica da peça, contudo ela deve estar presente na MfU, sendo ela o ponto de partida para qualquer MT com CNC. Por fugir do escopo deste trabalho esta não será analisada.

b) Tecnologia De Medição Na Máquina

Pode-se dividir a tecnologia de medição na máquina em função da sua atuação temporal em (fig. 2.12 e fig. 2.13):

- medição em processo: ocorre simultânea à usinagem onde a realimentação é feita sobre o controle da máquina (em tempo real), modificando a movimentação relativa ferramenta/peça, sendo entendida e classificada neste trabalho como um controle adaptativo geométrico (ACG). A sua realização prática tem-se mantido restrita quase que exclusivamente ao processo de retificação, em função da falta de sensores

adequados que possam operar sem interferência das adversas condições de usinagem dos demais processos de usinagem.

- medição intermitente ao processo: podendo ser realizada antes do início, durante pausas ou após concluído o processo de usinagem na máquina. Normalmente utiliza-se de tecnologia de medição por coordenadas /23/, medição diferencial /16/ ou de medição absoluta, sem contato /29/. No terceiro caso, utiliza-se do laser interferométrico aplicado em tornos CNC, com a vantagem de se ter uma unidade de medição com pequena incerteza de medição, que independe da precisão da máquina-ferramenta, o que em termos metrológicos é extremamente vantajoso. Com medição diferencial, necessita-se de dispositivos especiais que acessem o volume de trabalho da máquina-ferramenta para realizar a medição. Já a medição por coordenadas pode ser usada tanto em tornos como em centros de usinagem e fresadoras CNC's. As estratégias de realimentação são simples e seu maior campo de aplicação é a determinação de zero peça, superfícies de referência e ajustes de ferramenta /23/. Sua utilização para medição de peças apresenta muitas limitações, entre as quais: a incerteza de medição /22,23,41/ é dependente da precisão da máquina-ferramenta utilizada; pequena quantidade de rotinas (ciclos de medição) disponíveis para determinar as características da peça inspecionada /21,42/.

A estratégia de correção disponível, para a medição intermitente ao processo é totalmente manual e dependente da experiência do operador. Ao ser detectado um erro dimensional em algum elemento geométrico que compõe a peça, uma nova usinagem só se reinicializa após o operador analisar o problema e decidir por uma determinada ação corretiva, podendo ser:

- correção dos dados de ferramenta;
- correção da origem da peça;
- compensação de desgaste de ferramenta;
- correção dos parâmetros programados;
- repetição de trechos de usinagem;
- classificação da peça (boa, refugo ou reusinagem).

c) Tecnologia De Medição Próxima À Máquina

A medição próxima à máquina (fig. 2.12 e fig. 2.13) é aquela na qual o sistema de medição está localizado junto ou próximo à unidade de fabricação podendo atender uma ou mais unidades de fabricação /7,43/. Normalmente (fig.12), utiliza-se de medição diferencial, medição absoluta ou de medição por coordenadas. Na medição diferencial utiliza-se sistemas de medição rígidos baseados em transdutores indutivos de deslocamento, designados por sistema de medição multipontos, tendo uma aplicação típica no processo de torneamento /44,45/. Medição por coordenadas utilizando-se de máquinas de medir por coordenadas propicia uma flexibilidade inigualável em termos de variedade de peças passíveis de inspeção, pois a alteração se faz a nível de software e não de hardware, a fim de atender os requisitos geométricos da peça.

Pelo fato da medição ser pós-processo, a realimentação do processo se faz para corrigir/controlar a usinagem das peças seguintes. Esta realimentação, nos atuais sistemas de controle de qualidade, é baseada em ferramentas para controle estatístico de processo /16,46/, utilizando-se de: cartas de controles /47,48/, técnicas de pré-controle /46,49/ e/ou métodos de previsão /10,50/.

A utilização de métodos de previsão é mais recente e sua aplicação ainda está restrita a centros de pesquisa. Nestas, utilizando-se de séries temporais, faz-se uma análise temporal de dados passados, para prever a qualidade futura baseado em determinadas características geométricas que representam a peça/processo. Esta análise é fundamentada em um modelo matemático que leva em consideração alguns parâmetros do processo além, é claro, da dimensão característica da peça/processo.

Cartas de controle são utilizadas para avaliar a capacidade do processo, bem como, avaliar a estabilidade e detectar a tendência de cada dimensão controlada, a fim de acionar ações

corretivas preventivas sobre a MfU, para que as dimensões das peças seguintes sejam devidamente posicionadas no campo de tolerância especificado, permitindo a manutenção do processo de fabricação em faixas de tolerâncias bastante estreitas. Quando a tolerância de fabricação for maior (idealmente 1,3) ou igual a seis vezes à incerteza de fabricação do processo, pode-se adotar a técnica de pré-controle, a fim de controlar o processo, possibilitando uma diminuição dos custos de inspeção, devido o aumento do intervalo de amostragem de inspeção /46,49/.

Como estratégias de realimentação, baseadas nestes 3 métodos de medição, é possível atuar de forma automática na MfU por meio da alteração de dados de ferramenta /22,44/, a fim de compensar erros. Também, pode-se decidir sobre a interrupção da usinagem (alarme/parada da máquina) para evitar a produção de refugo/retrabalho, através da identificação de tendências do processo ou por meio de previsão. A determinação de troca de ferramenta não é possível baseando-se apenas nos dados de medição. É sabido e adotado como regra geral, que o resultado da medição dimensional da peça é inadequado como uma estratégia de monitoração de desgaste de ferramenta, porque os erros reconhecidos/determinados deste modo, não podem ser unicamente associados ao desgaste de ferramenta /19/. Para isso, ter efeito, seria necessário que o sistema levasse em consideração, por exemplo, a monitoração do tempo de vida da ferramenta, associando a ferramenta a seu tempo de utilização em relação ao número de peças usinadas. Hoje os sistemas para controle estatístico de processo não levam o tempo de utilização de ferramenta em consideração. Esta estratégia, como já comentado, deve ser implementada a nível de comando numérico e estes dados compartilhados com o sistema de controle de qualidade, isto quando não for possível a adoção de monitoração de desgaste/quebra de ferramenta por meio de medição em processo.

d) Tecnologia De Medição Integrada À Máquinas Interligadas

Esta tecnologia de medição é voltada para dois campos dentro da manufatura (fig. 2.13): controle de qualidade e supervisão/controle da movimentação de materiais. Apenas o campo referente ao controle de qualidade será focalizado (fig. 2.12).

Nestes, emprega-se medição pós-processo utilizando-se de máquina de medir por coordenadas integrada a nível físico ao sistema de manufatura (fig. 2.1), existindo ligações/conexões entre os diversos tipos de hardware e software que compõem o sistema. Assim, uma peça processada em uma unidade de fabricação é conduzida por uma unidade de movimentação automatizada, tipo AGV ou transportador contínuo de paletes, até a unidade de inspeção, ocorrendo uma interação de hardware e software ao longo de toda a movimentação da peça, supervisionada pela unidade de gerenciamento (MgU) do FMC/FMS.

As estratégias de realimentação são fundamentadas apenas em ferramentas para controle estatístico de processo, prevalecendo a utilização de cartas de controle, com as mesmas ações corretivas já descritas no item "c".

A tendência atual, neste campo do controle de qualidade é buscar a integração a nível lógico possibilitando, a partir da inspeção geométrica, uma realimentação automática baseada em uma análise de causas de erros e em uma adequada estratégia de correções. Esta filosofia de controle de qualidade é designada por inspeção em malha fechada, que certamente utilizar-se-á, também, de ferramentas estatísticas, como às utilizadas atualmente, associadas à sistemas especialistas /5,6/.

2.2 TENDÊNCIA DE SOLUÇÃO PARA O CONTROLE GEOMÉTRICO DA FABRICAÇÃO

Como apresentado nos itens anteriores, a fabricação em malha fechada não pode ser atingida utilizando-se apenas da monitoração das grandezas do processo ou, por outro lado, apenas das grandezas

da inspeção geométrica. Portanto, é preciso uma junção de recursos pois elas são complementares atuando em níveis hierárquicos diferentes /7,51,52,53/ e com estratégias e possibilidades de realimentação distintas (fig. 2.14). Para possibilitar a realização de uma célula de fabricação totalmente automática, um sistema de controle, para determinada operação de usinagem, poderá ser desenvolvido baseado no conceito de sistema hierárquico multicamada /51,53/. Usando este conceito, um sistema de controle faria a monitoração e realimentação do processo de usinagem em processo e pós-processo, a fim de: otimizar as variáveis de corte (ACO); modificar parâmetros de corte (ACC); corrigir movimentação de ferramenta (ACG); detectar/prevenir quebra de ferramenta; monitoração de desgaste de ferramenta; verificar, assegurar e melhorar a qualidade geométrica da peça.

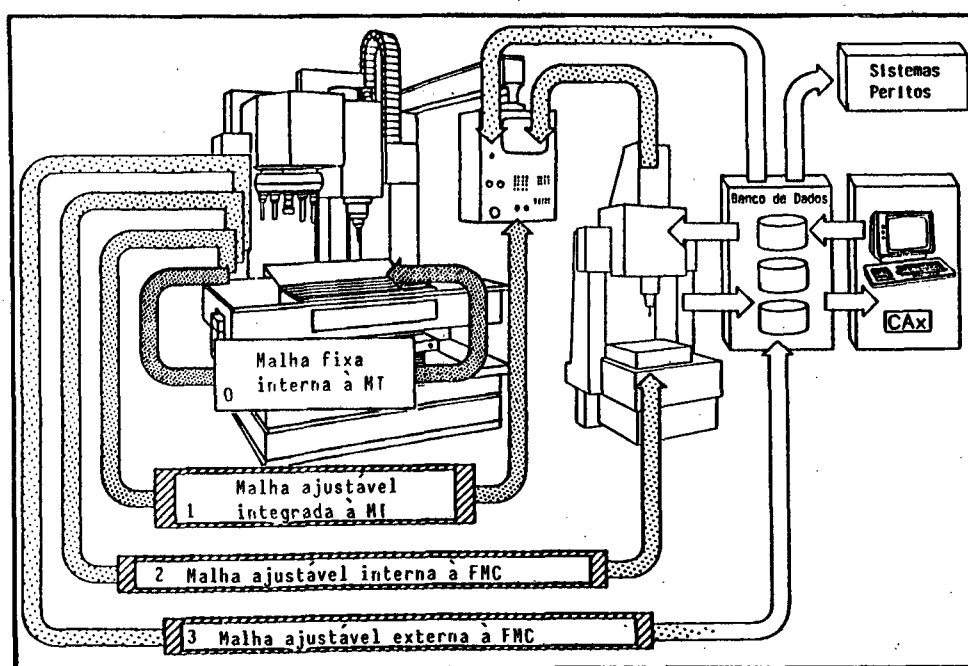


Figura 2.14 - Malhas de realimentação associadas aos quatro níveis hierárquicos (0,1,2 e 3) de uma FMC /7/

A fim de atingir um alto grau de automação um sistema de controle poderia ser composto, por exemplo (fig. 2.15): de um sistema ACC e de um sistema de monitoração de desgaste/quebra de ferramenta sendo estes em processo; e de um sistema de inspeção (CLI) para medição pós-processo. A nível mais baixo, o sistema de controle atuaria diretamente e em tempo real sobre os parâmetros do processo, dados tecnológicos (avanço, velocidade de corte, desgaste de ferramenta,

entre outros). A nível de inspeção, a realimentação ocorreria em termos de garantir o desempenho geométrico (qualidade dimensional da peça), atuando na parte de dados geométricos, alterando parâmetros desta natureza.

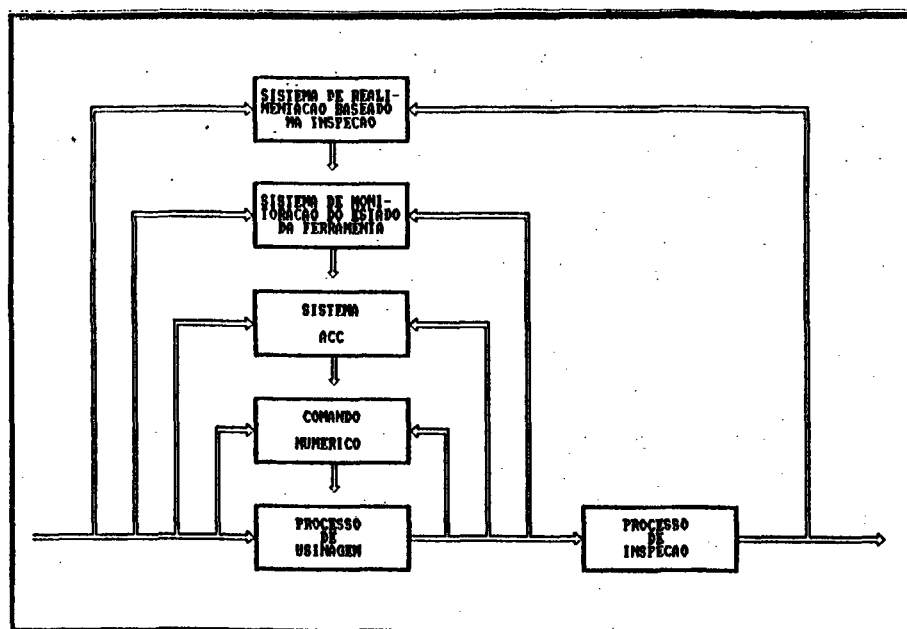


Figura 2.15 - Diagrama de bloco de um sistema de controle hierárquico multicamada /51/

2.3 INSPEÇÃO EM MALHA FECHADA - CLI -

Dentro das diversas malhas de realimentação da qualidade /7,53/ presentes entre o nível de planejamento e o nível de operação/processo (usinagem e medição), figura 2.16, podemos situar um sistema CLI a nível de operação de chão de fábrica, o qual, realiza a correção do processo de fabricação baseando-se nos dados de medição, realimentando a seguir o processo.

Funcionalmente /5/, um sistema CLI (fig. 2.17) deverá inspecionar a produção da célula de manufatura e comunicar os resultados de sua análise para o controlador da célula. Isto requer uma transferência automática, bidirecional de dados, dos elementos da célula para a estação de inspeção ; o controle remoto desta estação e uma análise automática do resultado de medição. A análise deverá avaliar as peças produzidas de acordo com os requisitos de tolerância

estabelecidos, estimar as causas dos erros detectados e determinar uma estratégia de correção para estes erros. O resultado desta análise deve ser comunicado ao controlador da célula, a fim de proporcionar a realimentação da máquina/processo de fabricação.

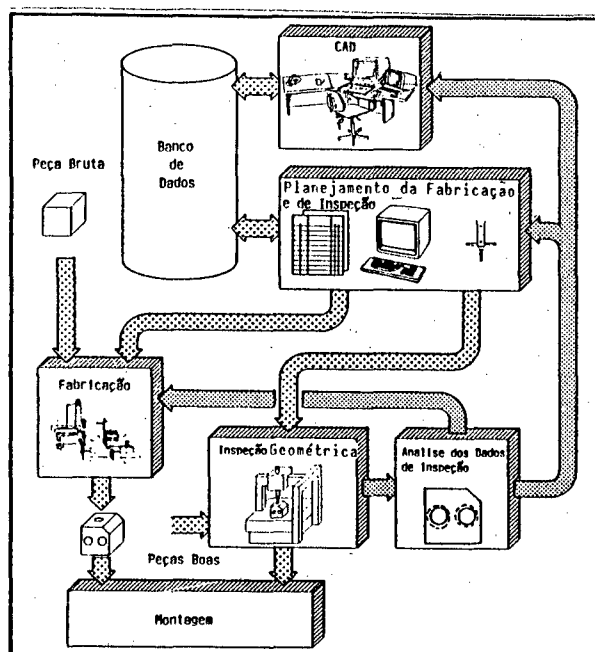


Figura 2.16 - Malhas de realimentação da qualidade entre os níveis de planejamento e de operação /7/

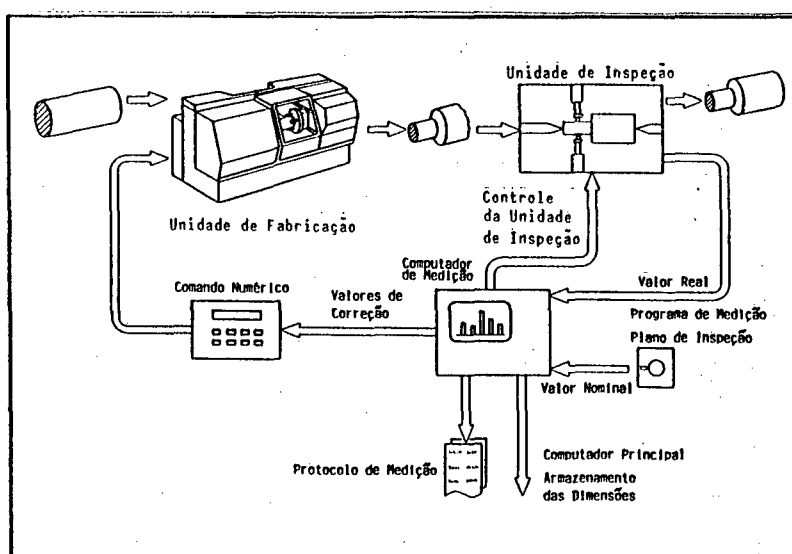


Figura 2.17 - Filosofia CLI /7/

O processo de análise dos dados é constituído por duas etapas distintas (fig. 2.18): análise de tolerância e análise de manufatura. A primeira, detecta e/ou identifica erros/tendências de erros nos elementos geométricos que constituem a peça, a partir das especificações de projeto (tolerâncias e dados nominais) e dos dados de medição geométrica da peça. A segunda, faz um diagnóstico das causas de erros (baseada na análise de tolerância) seguido da adoção de uma apropriada estratégia/ação de correções de erros, determinando onde os erros observados aparecem e como o processo de fabricação deve ser alterado para produzir peças de melhor qualidade, propiciando a realimentação do processo e fechando a malha de fabricação.

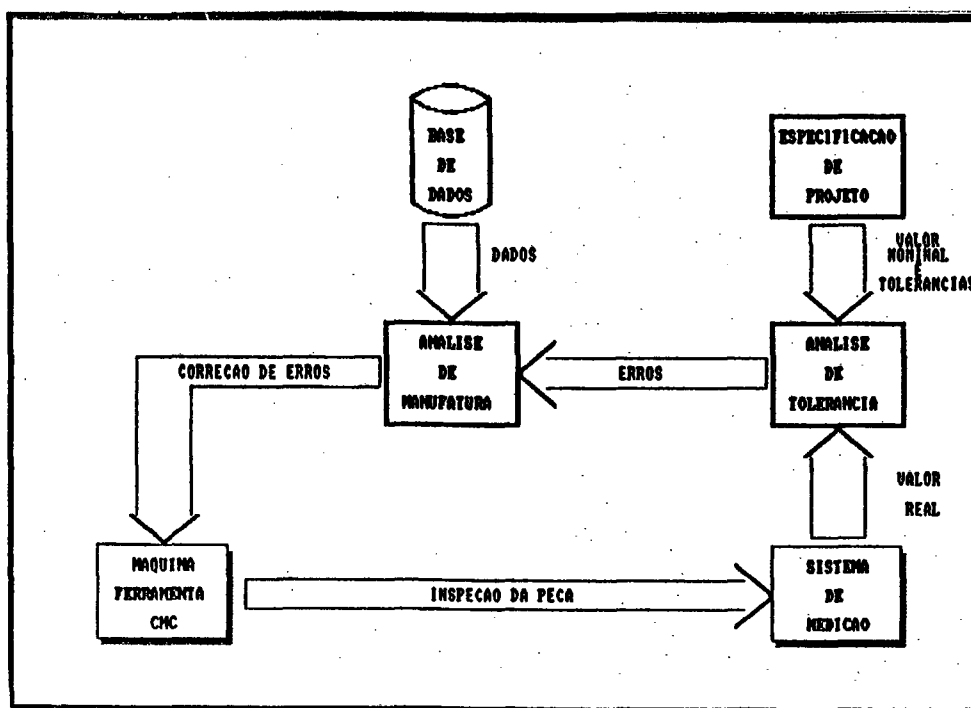


Figura 2.18 - Etapas de um sistema CLI /5/

O desenvolvimento de um "modelo" do processo de fabricação que determine a causa de erro observada e ofereça estratégias de correções adequadas, é um problema típico para sistemas especialistas, embora um modelo simples, tipo uma base de conhecimento associada a regras possa oferecer resultados proveitosos, sem necessitar da sofisticação de um sistema especialista /1,54/.

3. ANÁLISE FUNCIONAL DOS ELEMENTOS QUE COMPÕEM UM SISTEMA CLI

Neste capítulo são analisados minuciosamente os elementos que influenciam o desenvolvimento de uma metodologia CLI. Para o desenvolvimento de um sistema dessa natureza é necessário, inicialmente, analisar os diversos elementos envolvidos, a fim de possibilitar o estabelecimento de uma metodologia de realimentação. Os principais elementos envolvidos dizem respeito a:

- fontes de erros do processo de usinagem, sua análise possibilitará a identificação do que se pode corrigir a partir dos dados de medição geométrica;
- sistemas de medição e de programação NC de máquinas-ferramenta;
- relacionamento/ligação lógica entre os processos de inspeção e o de fabricação.

3.1 DELIMITAÇÃO

O sistema analisado neste trabalho é dirigido para aplicação em FMC/FMS e usinagem de peças prismáticas, a partir de dados da inspeção dimensional de operações de furação e correlatas (mandrilamento, alargamento, rebaixamento e escariamento), operações de fresamento frontal e de contorno, ou seja, operações que envolvem 2 ou 2^{1/2} eixos em centros de usinagem.

3.2 ANÁLISE DE FONTES DE ERROS EM PROCESSOS DE USINAGEM CNC

Os erros geométricos presentes nas peças processadas na usinagem com tecnologia CNC (fig. 3.1), utilizando-se de ferramentas de corte com geometria definida, podem ser atribuídos basicamente a quatro grupos de fontes de erros /48,55,56/:

- máquina-ferramenta CNC;
- programação NC;
- processo de usinagem;

- outros fatores.

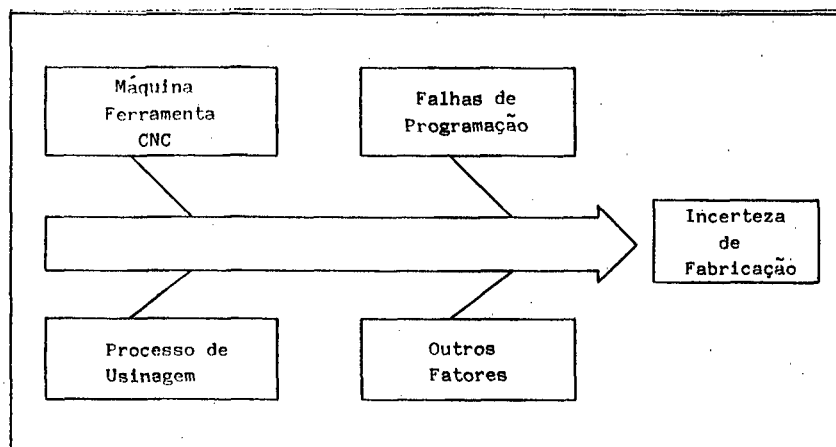


Figura 3.1 - Causas de erros geométricos nas peças produzidas pelo processo de usinagem CNC

Os erros presentes nas dimensões de peças usinadas revelam inicialmente a variabilidade do processo de fabricação. Esta variabilidade/dispersão apresenta uma distribuição normal /46/, quando o processo está sob controle, sendo os erros devido apenas a fatores aleatórios. A falta de controle do processo é devido a fatores especiais onde, além dos erros aleatórios têm-se a presença de erros sistemáticos e/ou de um terceiro tipo de erro denominado, neste trabalho, por erros progressivos (fig. 3.2). Os erros progressivos, em sua essência, apresentam a mesma natureza dos erros sistemáticos, contudo possuem um caráter dinâmico evoluindo gradativamente ao longo do tempo, devido a variação de alguma grandeza do processo (temperatura, desgaste de ferramenta, etc), ao contrário dos erros sistemáticos que apresentam um caráter permanente.

A soma das três componentes de erro determinam o erro máximo denominado de incerteza de fabricação para uma determinada máquina/processo e determinadas condições de operação. O nível da variabilidade, quando o processo está sob controle, determinará a incerteza de fabricação que dependerá, fundamentalmente das características construtivas da máquina-ferramenta e estas dos meios empregados em sua produção (fabricação, inspeção e montagem), além do ferramental e dispositivos empregados. Na incerteza de fabricação distingue-se uma parcela de erro sempre presente e

inerente ao processo/máquina, que diz respeito às fontes de erros aleatórios, as quais não podem ser controladas e compensadas devido a seu caráter aleatório. Por outro lado, uma segunda parcela que diz respeito a erros sistemáticos e progressivos. Estes podem ser compensados e corrigidos, a fim de melhorar/manter a qualidade geométrica da peça.

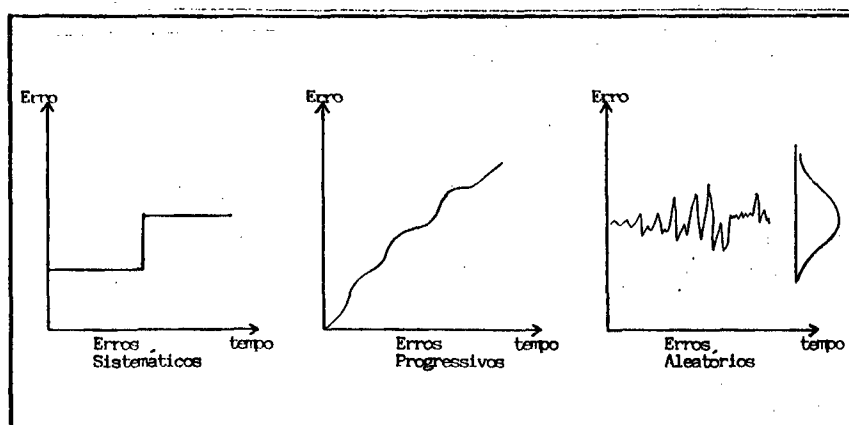


Figura 3.2 - Caracterização da natureza dos erros

Diversos são os fatores, dentro destes 4 grupos de erros, (fig. 3.3 à 3.6), que determinam a incerteza de fabricação da máquina/processo, sendo os mais relevantes os seguintes:

- efeitos térmicos, causados pela temperatura ambiente e pelo calor gerado no interior da máquina (cavaco, atrito, motores elétricos, etc), afetando a estrutura da máquina principalmente o conjunto árvore/mancais, além da própria peça e dos sistemas de medição e controle da máquina, sendo responsáveis por uma parcela significativa dos erros progressivos e, também, por uma parcela de erros aleatórios /10,56,57/;
- desgaste de ferramenta (erros progressivos);
- rigidez estática e dinâmica da máquina-ferramenta (erros aleatórios);
- qualidade geométrica da máquina ferramenta (dos seus componentes e de sua montagem); efeito "stick-slip" entre os componentes em movimento; sistemas de medição e acionamento da máquina (sistema de controle). Estes fatores determinam o erro de posicionamento da ferramenta de corte (erros aleatórios, sistemáticos e progressivos).

A maioria dos fatores de erros, referentes à máquina ferramenta CNC e ao processo de usinagem (fig. 3.3 e 3.4), que influenciam o resultado do trabalho da unidade de fabricação, só poderão ser evitados e/ou minimizados, caso sejam utilizados, no projeto e na fabricação da máquina-ferramenta técnicas que minimizem estes fatores de erros /56,58/, além de algumas medidas operacionais, quando da sua utilização. Assim, tende-se a: melhorar o rendimento dos fusos de esfera recirculantes e transmissões; utilizar para a construção da estrutura das máquinas materiais com boa estabilidade térmica; minimizar as fontes internas de calor e localizá-las para fora da estrutura básica da máquina; melhorar a rigidez dinâmica da máquina; utilizar materiais com baixo coeficiente de atrito; pré-aquecimento da máquina; climatização do ambiente; proteção contra radiação solar e circulação de ar (convecção); entre outros. Por outro lado, tem-se que levar em consideração aspectos quanto ao processo, propriamente dito: seleção do tipo e do material da ferramenta utilizada; condições tecnológicas de usinagem; material da peça; fixação; etc.

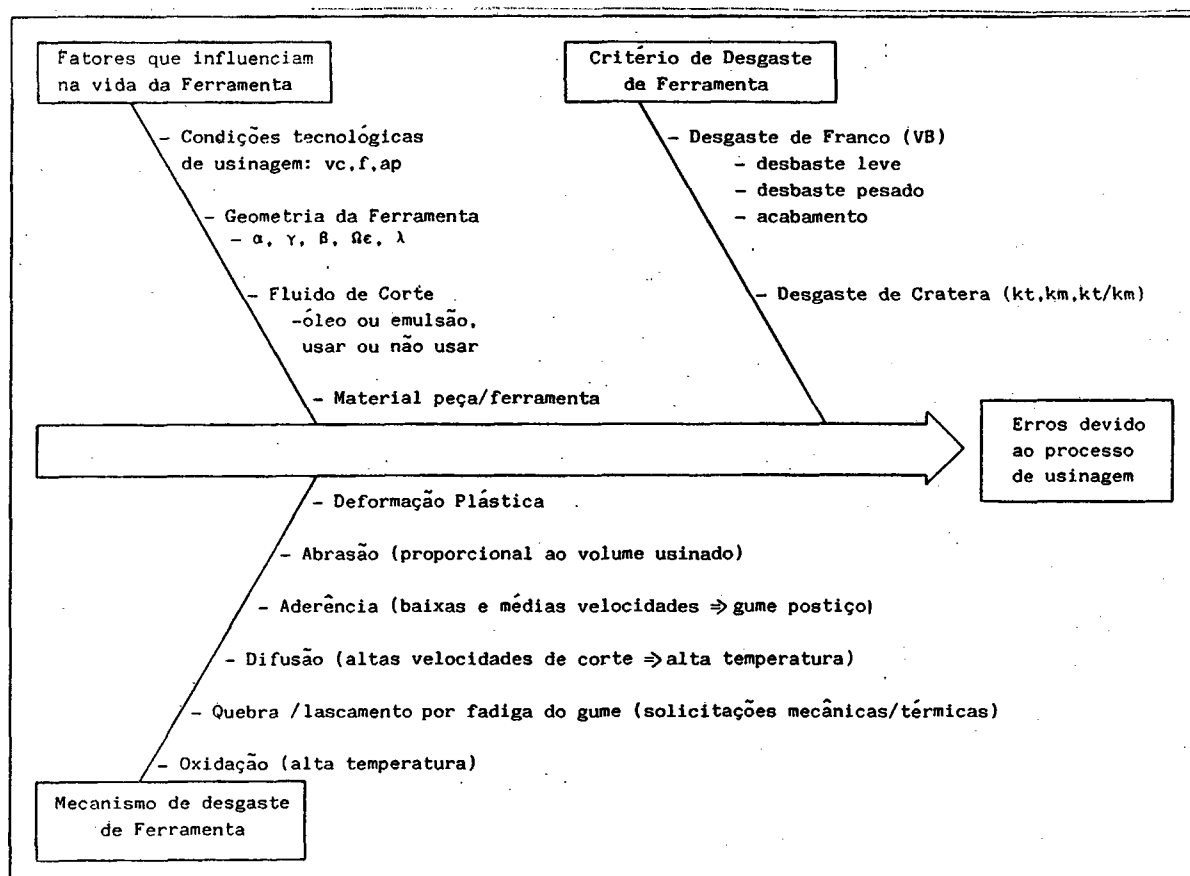


Figura 3.3 - Fontes de erros ligadas ao processo de usinagem CNC.

Os principais fatores de erros devido à máquina/processo (fig. 3.3 e 3.4) são causados por deformações térmicas e desgaste de ferramentas /57,59,60/, sendo estes erros bem mais representativos em operações de desbaste do que em operações de acabamento. Entretanto, quando uma operação de desbaste apresenta um erro significativo (da ordem de décimo de mm ou mais), na operação de acabamento, este erro provocará uma qualidade dimensional/superficial inferior à qualidade desejada, pois a sobre-medida de material presente a mais, influenciará na qualidade geométrica da peça.

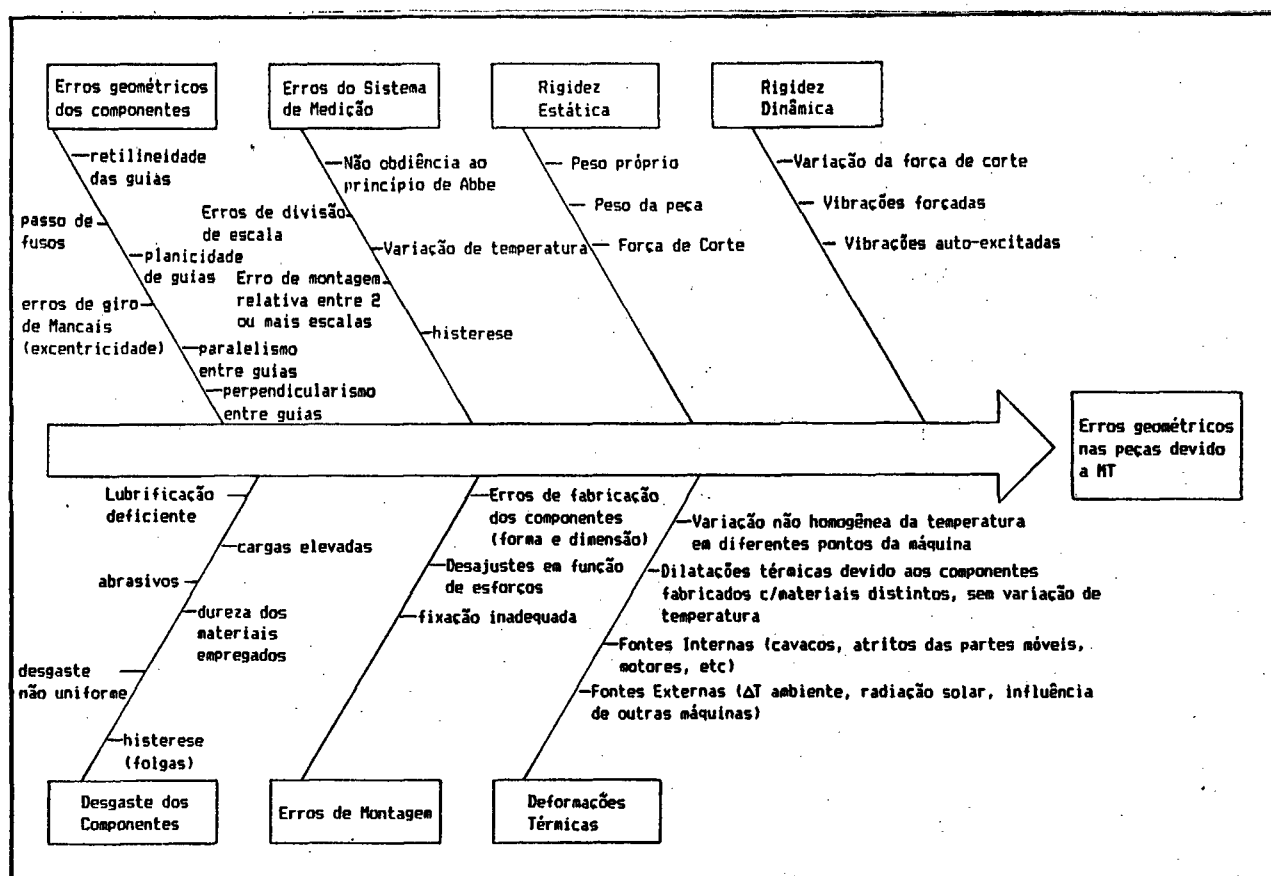


Figura 3.4 - Fontes de erros ligadas a erros geométricos em máquinas-ferramenta

Além dos fatores de erros relacionados à máquina/processo, pode-se ter presente erros devidos a programação NC e a outros fatores (fig. 3.5 e 3.6). Estes dois últimos grupos de fontes erros podem aparecer superpostos aos erros dependentes diretamente da máquina/processo. A identificação e separação destas diversas

fontes de erros, baseando-se na inspeção dimensional é um problema demasiadamente complexo e de difícil solução.

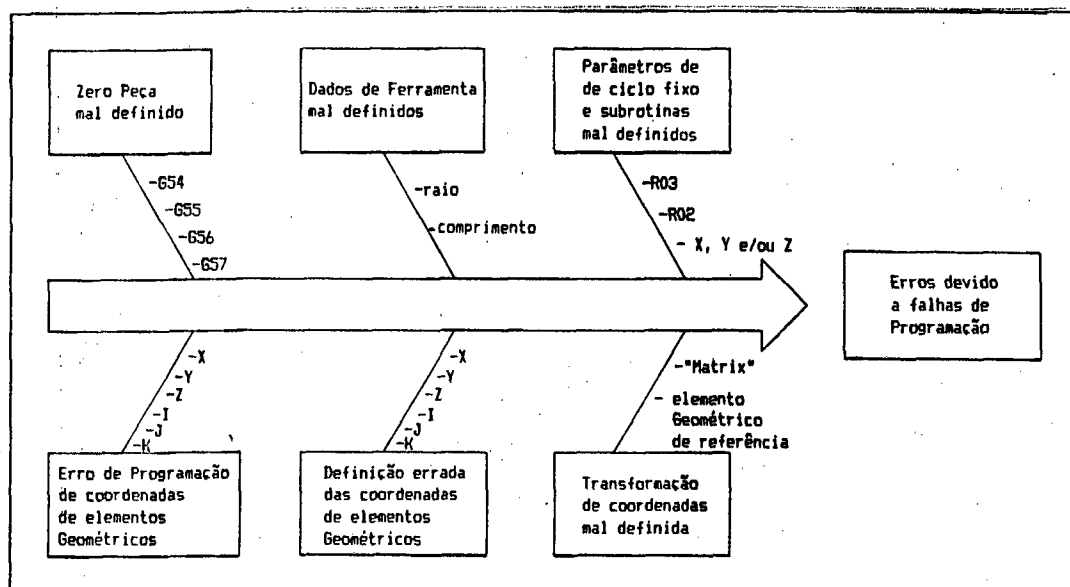


Figura 3.5 - Fontes de erros ligadas à falhas de programação

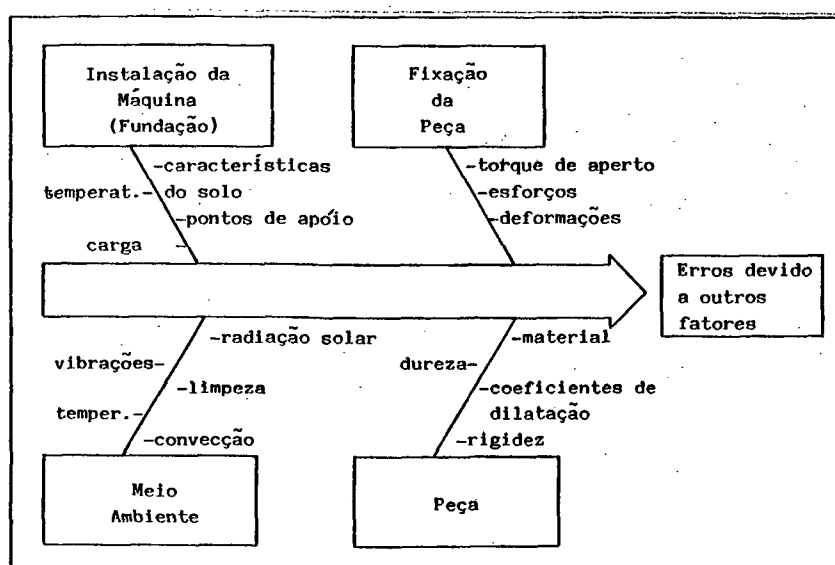


Figura 3.6 - Fontes de erros devido a outros fatores

A figura 3.7 apresenta alguns exemplos típicos de erros geométricos que podem aparecer na usinagem das peças.

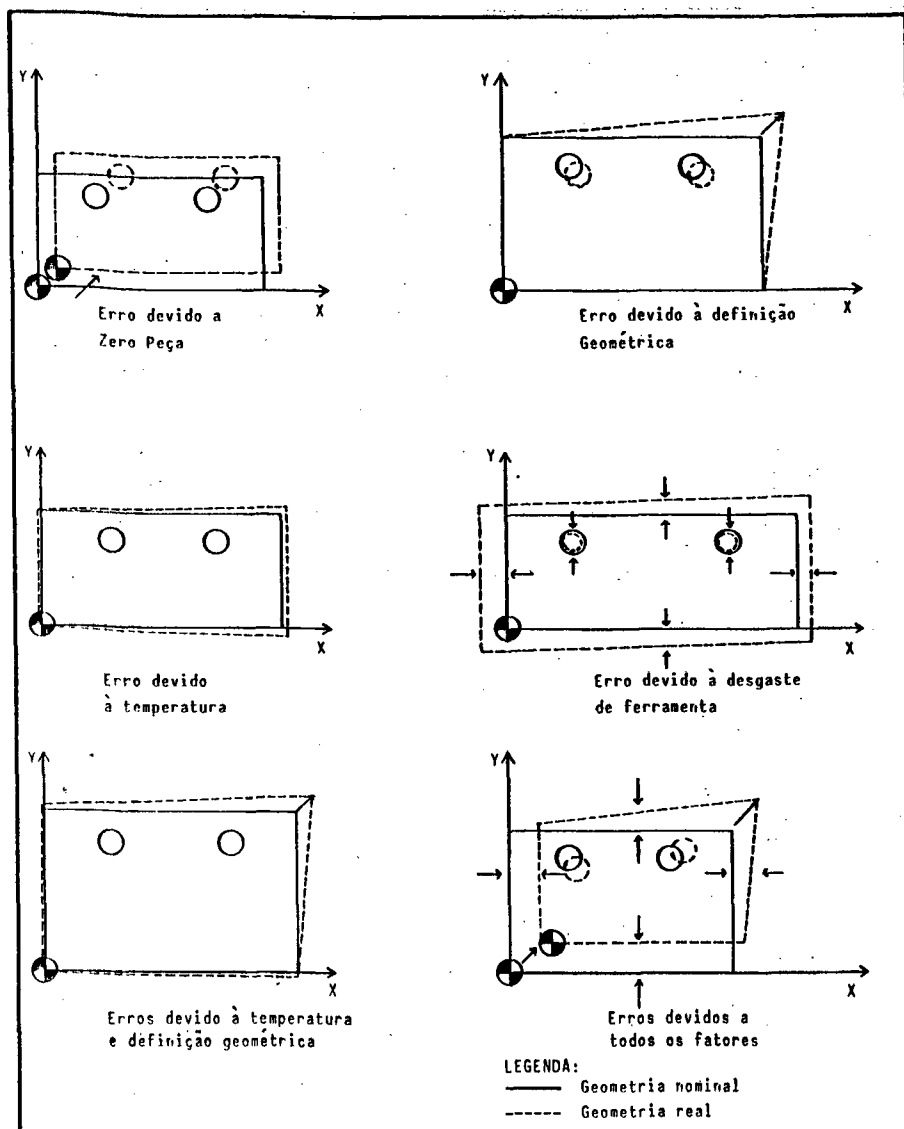


Figura 3.7 - Erros geométricos típicos e suas causas principais

3.3 FONTES DE ERROS PASSÍVEIS DE CORREÇÃO

Uma análise baseada apenas em dados de medição dimensional/geométrica não possibilita a identificação da fonte de erro, mas sim a sua quantificação. A identificação da particular causa de erro, entre todas as fontes, é um problema demasiadamente complexo, devido à multiplicidade das variáveis e dos fatores que atuam sobre o processo/máquina /10/. Um modelamento do processo torna-se assim inviável, pois apresentaria características não lineares por causa do comportamento interdependente das variáveis.

Portanto, é possível o diagnóstico e a correção de erros, basicamente, devido a falhas de programação de definições geométricas e desgaste de ferramenta (erros intrínsecos). Indiretamente, sem conhecer a fonte real de erro, efeitos térmicos e erros geométricos da máquina-ferramenta CNC que, em última instância, são corrigidos de forma global em conjunto com os erros intrínsecos (fig. 3.8). O valor do erro é determinado de acordo com:

$$E = VR - VN \quad (3.1)$$

onde: E = erro global

VR = valor real (Dr - dimensão real)

VN = valor nominal (Dn - dimensão nominal)

Em resumo, quando constatado um erro, em um determinado elemento geométrico da peça, este erro será designado de forma genérica como causado por (fig. 3.8):

- falhas de programação de definições geométricas;
- desgaste de ferramenta;
- efeitos térmicos;
- erros geométricos da máquina-ferramenta.

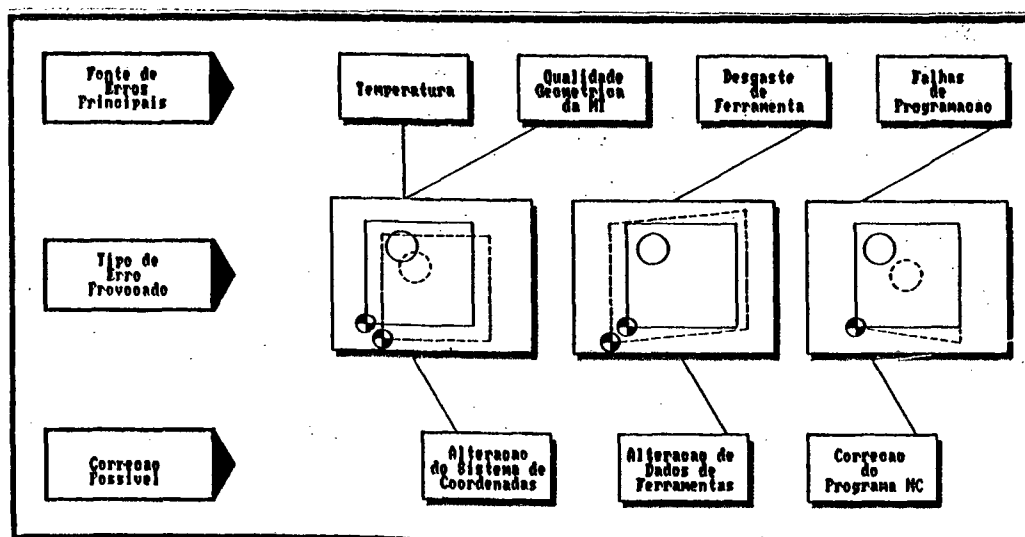


Figura 3.8 - Fontes de erros e ações corretivas possíveis

O erro é designado de forma genérica como sendo devido a estes quatro fatores, pois é praticamente impossível o seu diagnóstico, a

sua separação e classificação, baseando-se apenas na verificação geométrica da peça, sem se ter dados sobre ensaios geométricos da máquina-ferramenta /56,61,63/, e sem a monitoração do processo de usinagem e a utilização de modelos de compensação de erros devido a efeitos térmicos e erros geométricos da máquina-ferramenta. Existem diversas abordagens /57,62/ para sistemas de compensação, podendo ser por hardware ou software, sendo a abordagem por software, a mais utilizada.

A compensação de erros geométricos é, normalmente, obtida pelo armazenamento dos valores de correção em uma matriz de correção de erros geométricos (determinados por um ensaio geométrico) e compartilhado com o sistema de controle da máquina-ferramenta, sendo o mesmo princípio utilizado na compensação de erros geométricos em CMM /64/.

A compensação de erros de origem térmica pode ser realizada pelo mesmo método utilizado para correção de erros geométricos, com o inconveniente de se necessitar de uma grande capacidade de ajustes de matrizes de erros térmicos, o que a inviabiliza /57,62/. Uma outra abordagem consiste na construção de um modelo de predição para efeitos térmicos, no qual se ajusta uma equação de regressão, obtida a partir do cálculo do perfil de temperatura através do método de diferenças finitas e da determinação da deformação resultante pela solução de equações termo-elásticas associadas, utilizando-se de elementos finitos para sua solução /57/. A utilização destes métodos de compensação foge do escopo deste trabalho.

Diante do exposto, conclui-se que a partir dos dados de medição dimensional a correção dos erros (de forma geral) dar-se-ão sobre as definições geométricas da programação NC e sobre a definição dos dados de ferramentas; englobando, assim, a correção das fontes de erros mais significativas, que aparecem na fabricação da peça.

3.4 REQUISITOS PARA PROGRAMAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

O sistema adotado de programação "off-line" de máquinas-ferramenta CNC é baseado na programação assistida por computador do tipo APT, podendo-se utilizar tanto o processador APT quanto o EXAPT.

Esta escolha se deu pelo APT ser, entre todos os sistemas de programação automáticos /66,67/ (família APT, gráficos interativos com estrutura de dados CAD ou APT, entre outros), o mais difundido, flexível e poderoso meio de programação existente /68/.

3.4.1 Requisitos Funcionais Para o Sistema De Programação

O principal requisito para o sistema de programação, a fim de viabilizar a correção automática das definições geométricas inconsistentes, desgaste de ferramenta e efeitos térmicos, é que seja acessível e transparente o relacionamento da movimentação de ferramenta com a definição geométrica que a originou. Deve ser possível a identificação e o acesso de uma dada movimentação, referenciando-a à uma determinada entidade geométrica, que é a mesma utilizada quando da inspeção da peça. Tanto na fabricação quanto na inspeção, as entidades geométricas terão a mesma identificação (fig. 3.9), possibilitando a sua associação de forma automática.

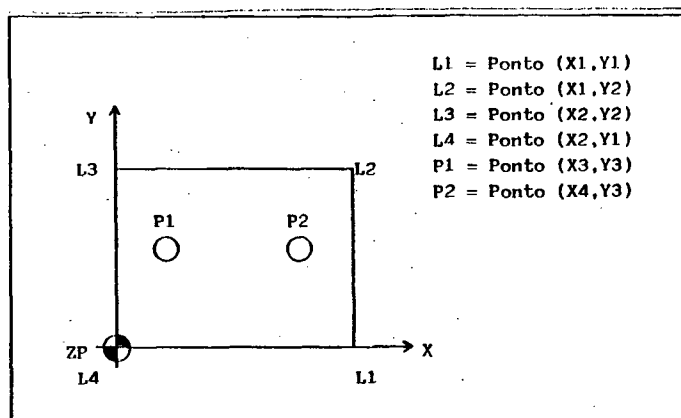


Figura 3.9 - Relacionamento dos processos de fabricação e inspeção através da mesma definição geométrica

3.4.2 Métodos De Programação NC De Interesse

Nos sistemas tipo APT (EXAPT, ADAPT, Compact II, etc.) existem três tipos de definições /69,70/: geométricas, tecnológicas e de movimentação. A definição geométrica associada à de movimentação é a de interesse para o desenvolvimento do trabalho. É a partir da definição geométrica, que se faz toda a identificação dos elementos geométricos que compõem a peça.

Em sistemas de programação gráfico-interativos com estrutura de dados APT têm-se disponível, como nos sistemas clássicos tipo APT, os mesmos recursos de identificação da parte de definição geométrica /66/, ou seja, consegue-se através do sistema CAD/CAM o relacionamento necessário entre a parte de definição geométrica com a de movimentação.

Já sistemas de programação gráfico-interativo com estrutura de dados CAD, os quais geram de forma automática, em uma única etapa /71,72/, o programa NC para uma específica máquina/comando, não existindo a figura do processador e do pós-processador, sendo necessário adaptá-lo para se obter este relacionamento, a fim de viabilizar a sua utilização. Em sistemas tipo APT este relacionamento já está disponível, sendo este o principal requisito para o sistema de programação.

Do ponto de vista do tipo de sistema de programação de MT com CNC, constata-se que é praticamente impossível desenvolver um sistema universal de inspeção em malha fechada, que atenda todos os tipos de linguagens de programação automática (gráficos interativos ou auxiliados por computador do tipo APT), pois cada um trata a parte de definição geométrica de uma determinada maneira, tanto na sua estrutura quanto na entrada de dados /67/. Assim, para atender a maioria dos sistemas de programação existentes, adota-se como referência o APT, podendo utilizar-se também do EXAPT.

Portanto, restringindo o universo da linguagem de programação, com suas respectivas estruturas e entradas de dados diferentes, e a complexidade das definições geométricas, é possível desenvolver um sistema em "malha fechada" para corrigir as definições geométricas

inconsistentes, não sendo necessário, assim, deduções por parte do programador ou operador de quaisquer parâmetros/coordenadas, a serem alterados para corrigir o programa NC.

3.4.3 Análise Da Linguagem APT

Em linguagem automática o procedimento normal para descrever a forma geométrica da peça é dividi-la em segmentos de linhas e arcos, que delimitam o seu contorno (fresamento) e pontos (furação), os quais são definidos por linhas, círculos e pontos. Um elemento geométrico qualquer pode ser definido de muitas maneiras. Contudo, seria altamente ineficiente, do ponto de vista computacional, passar todas estas informações, seção a seção no processador APT ou similar, até a geração do CLFile. Assim, o processador APT reduz para um formato comum, cada elemento geométrico definido de uma determinada maneira oferecida pelo sistema (em APT existem de 1 a 14 métodos diferentes de definições /70/). Este formato é chamado de forma canônica, sendo usualmente, a expressão analítica mais básica para cada entidade em questão /69,70/.

Existe uma grande quantidade de elementos geométricos disponíveis nos diversos processadores de linguagem automática /73/. Contudo, neste trabalho são abordados quatro entidades geométricas (ponto, linha, círculo e plano), sendo estas, as mais utilizadas em qualquer peça programada para centros de usinagem. Além destes quatro elementos básicos, utilizar-se-á, também, algumas declarações/recursos especiais:

- declarações "patern", dos tipos: linear, arco e grade;
- declarações de transformações, por exemplo, espelhamento;
- macros criadas pelo programador;
- ciclos fixos e sub-rotinas próprias da máquina/comando.

O programa desenvolvido em uma linguagem de programação de alto nível, tipo APT (fig. 3.10), é submetido ao processador, que gera um arquivo com uma estrutura de dados (formato das palavras) específico /67,69/ de acordo com a linguagem adotada. Este arquivo, chamado de arquivo/dados de localização da ferramenta (CLFile ou

CLData), contem as seqüências dos pontos que descrevem as trajetórias das ferramentas. Possui, ainda, os parâmetros tecnológicos de corte, tempo de espera, especificações de compensação de comprimento e raio de ferramenta, declarações só interpretadas pelo pós-processador, comentários, entre outros. A seguir, o CLFile é submetido a um pós-processador específico, de um determinado conjunto máquina/comando o qual gera o código G, ou seja: o conjunto de funções de linguagem manual (baixo nível) aceito pelo CNC. O código G apresenta diversos padrões /65/, sendo os mais difundidos: EIA (RS 274), ISO 6983 e DIN 66025. De maneira geral, apresentam a mesma recomendação no que diz respeito às funções "G", palavra para movimentação de ferramenta (G00, G01, G02 e G03), divergindo em relação aos: códigos das funções-miscelânea, algarismos significativos, codificações binária dos caracteres, entre outros. A partir deste momento código G deve ser entendido como "comandos G" normalizados pela EIA/ISO/DIN.

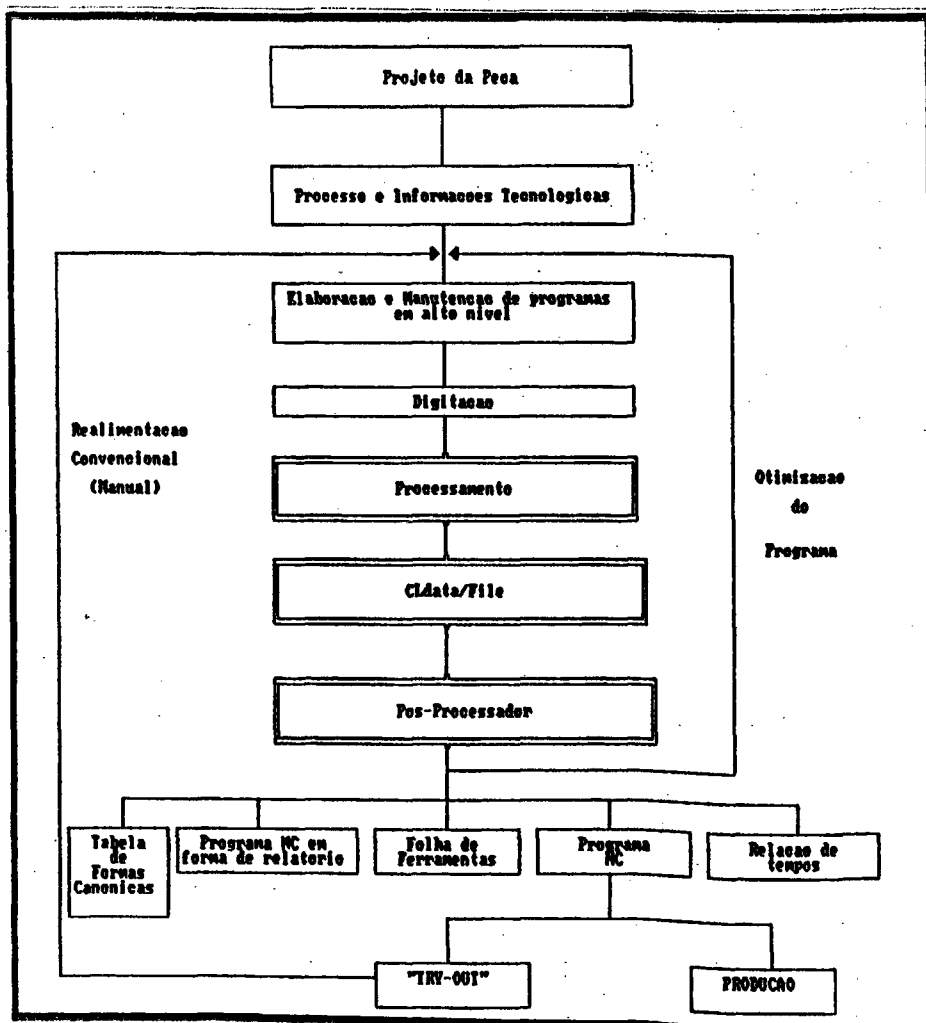


Figura 3.10 - Etapas de um sistema de programação tipo APT

O pós-processador emite relatórios auxiliares, cuja a finalidade é facilitar o trabalho de documentação e análise, sendo normalmente fornecidos quatro relatórios (fig. 3.10). Dentre eles, têm-se um relatório/arquivo chamado, neste trabalho, de programa NC com comentários na forma de relatório, no qual toda a movimentação de ferramenta (código G) está associada a definição geométrica que a originou. Este relacionamento, movimentação de ferramenta/definição geométrica, é apresentado através da identificação do elemento geométrico que a originou, estando definido em um campo pré-estabelecido neste arquivo/relatório (fig. 3.11).

* BLOCOS DE INFORMACOES	CARD	NONE	X	Y	Z	B	AVANCO	ROTAC	TEMPO
* EM LINGUAGEM MANUAL								RPM	

* N1160 X0 Y-86	85	L6	0.00	-85.66	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1170 Z5	87		0.00	-85.66	5.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1190 X-70 Y-11	148	P7	-70.00	-11.00	5.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1190 D004	74	F7	-70.00	-11.00	5.00	0.00	15000.0	800.0	0.01
* N1200 Z-20.15	75		-70.00	-11.00	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1210 X-4	76		-4.00	-11.00	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1220 Y94	77	L1	-4.00	94.00	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1230 X40	78	L2	60.00	94.00	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.01
* N1240 G02 X83.75 Y70 I0 J-24 F360	79	C1	84.00	70.00	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1250 X78.625 Y55.176 I-24 J0	79	C1	78.87	55.18	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1260 G03 X76 Y51.051 I34.604 J-27.176 F275	80	C2	76.00	51.05	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1270 X69.479 Y28 I37.479 J-23.051	81	C2	69.48	28.00	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1280 X84 Y-4.665 I44 J0	81	C2	84.00	-4.66	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1290 G00 Y-24 F300	82	L3	84.00	-24.00	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1300 X44.25	83	L4	44.00	-24.00	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1310 Y-41.657	84	L5	44.00	-41.66	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1320 X0 Y-86	85	L6	0.00	-85.66	-20.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1330 Z5	87		0.00	-85.66	5.00	0.00	15000.0	800.0	0.00

N1 ***** INICIO DE ESPELHAMENTO FRESAMENTO *****									

* N1340 X290 Y-11	59	P9	290.00	-11.00	5.00	0.00	15000.0	800.0	0.00
* N1350 G01 Z-20	61		290.00	-11.00	-20.00	0.00	300.0	800.0	0.02
* N1360 Z5 D005	74	P7	290.00	-11.00	5.00	0.00	300.0	800.0	0.08

Figura 3.11 - Programa NC com comentário na forma de relatório

Nas três etapas principais da programação automática tipo APT (elaboração do programa, processamento do programa e pós-processamento do CLFile) constata-se que é possível ter esta identificação tanto nas seções geradas pelo processador quanto pelo pós-processador. Em linguagem de alto nível esta identificação está

presente: na forma em que foram definidas/digitadas, na tabela de forma canônica e no CLFile. Em linguagem de baixo nível tem-se esta identificação apenas no programa NC com comentário na forma de relatório. Assim este relacionamento está presente em quatro casos.

3.4.4 Comparação Das Opções De Identificação Disponíveis Em "APT"

A seguir, faz-se uma análise comparativa dos quatro casos enumerados, apresentando os seus prós e contras para determinar a melhor solução, de relacionameto da movimentação de ferramenta com a definição geométrica que a originou:

- a) Correção das Definições Geométricas em Linguagem Tipo APT, na Forma de Declaração em Que Foram Definidas:

A implementação desta solução restringiria bastante o poder destas linguagens. Entre outras deficiências, as definições geométricas teriam de ser restringidas à apenas alguns tipos de declarações, definições de ponto e mais alguns parâmetros. Isto devido aos dados de medição, que são fornecidos na forma de coordenadas X,Y,Z e mais alguns parâmetros, o que inviabiliza a sua adoção.

- b) Correção das Definições Geométricas em Linguagem Tipo APT, Gráficos Interativos ou Não, na Sua Representação Canônica:

A grande dificuldade de implementação reside no fato do arquivo da tabela de formas canônicas, gerado pelo processador, não ser facilmente acessível, sendo apenas disponível para o usuário na forma de relatório e não em forma de arquivo. Para implementar esta solução seria necessário ter acesso ao arquivo, para se fazer as correções necessárias e submeter novamente ao processador. Como estas linguagens são "pacotes" fechados isto dificulta, em muito, a sua implementação.

Idealmente é bastante atraente a sua adoção, pois a alteração dos elementos geométricos na sua forma canônica possibilita uma independência em relação à considerações de movimentação

de ferramenta, tratando apenas da parte geométrica a qual é independente das definições de movimentação.

Sua viabilidade esta associada ao acesso a este arquivo e, também, a requisitos de comunicação entre os sistemas computacionais utilizados e o tempo de resposta destes.

c) Correção das Definições Geométricas no Arquivo CLFile:

Como o CLFile representa, detalhadamente, toda a movimentação de ferramenta o que implica em um arquivo de dados muito volumoso, requerendo um grande esforço computacional, além do fato de se ter que submeter o programa a um novo pós-processamento, o que elevaria, sobremaneira, o tempo de realimentação. Esta observação também é válida para o caso da tabela de formas canônicas.

Com referência ao esforço computacional, toma-se como exemplo a programação de uma peça relativamente simples, na qual o programa em código G possui 232 blocos/linhas, enquanto que o CLFile apresenta 3074 linhas. Portanto, um aumento de quase quinze vezes em relação ao código G. Isto inviabiliza a sua implementação, a nível de um "computador tipo PC XT/AT", pois o tempo de processamento é drasticamente aumentado, devido às inúmeras iterações que seriam necessárias para alterar as coordenadas e outros parâmetros, pois apenas a última e a primeira linha (coordenadas inicial e final), de uma determinada movimentação (interpolação circular ou linear), seriam necessárias para efetuar as ações corretivas. Toda a movimentação intermediária é desnecessária. Assim, a sua implementação exige um grande esforço de pesquisa, comparações e exclusões.

d) Correção das Definições Geométricas em Código G - Programa NC Com Comentários na Forma de Relatório:

A maior dificuldade reside na identificação e relacionamento das coordenadas X,Y,Z e/ou I,J,K associadas à considerações de movimentação de ferramenta e aos elementos geométricos

fora das especificações de tolerância. No caso de operações de furação/correlatas, este procedimento não é muito trabalhoso devido ao caráter da movimentação de ferramenta ser ponto a ponto, ou seja, exige-se pouco em relação as definições geométricas e de movimentação. Já, para operações de fresamento torna-se bastante complicado esta identificação, por causa da grande diversidade de movimentos possíveis, exigindo-se muito em relação as definições geométricas e de movimentação.

Esta opção exige poucas modificações para a saída do processador e pós-processador. Estas ocorrem a nível de pós-processador, para se ter, no programa NC com comentários /69,70/, as informações necessárias de identificação do elemento geométrico que gerou a movimentação. Têm-se à disposição outras informações (fig. 3.11), tais como:

- condições tecnológicas de usinagem;
- coordenadas do gume da ferramenta;
- número da linha no CLFile que gerou o bloco em código G;
- tempo de usinagem.

3.4.5 Solução Adotada

Na escolha da melhor solução deve-se ter um compromisso entre o poder de processamento do hardware disponível e o grau de esforço computacional envolvido na solução do problema. Além disso, têm-se que levar em consideração o tempo de realimentação, que não deve comprometer a produtividade.

Resumidamente, pode-se dizer que dentre as opções mais viáveis, CLFile e programa NC com comentários, a mais adequada é a adoção de correções sobre o programa NC com comentários. O CLFile, além de todas as limitações já apontadas e apesar de padronizado (DIN 66215) não apresenta uma estrutura de dados universal /74/, o que leva, dependendo da linguagem de programação utilizada, a uma implementação particular para o sistema de realimentação. Por outro lado, a linguagem de baixo nível (código G) apresenta a mesma estrutura quanto aos aspectos desejados, apesar das diversas

especificações adotadas (EIA e DIN), possibilitando um grau de universalidade muito maior (fig. 3.12).

MODO DE CORRECAO	CARACTERISTICAS	ESFORÇO COMPUTACIONAL	TEMPO DE RESPOSTA	DIFICULDADE DE IMPLIMENTACAO	GRAU DE UNIVERSALIDADE
CODIGO G		MEDIO	PEQUENO	MESMO	ALTO
CLFile		GRANDE	MEDIO	MESMO	BAIXO

Figura 3.12 - Comparação CLFile X programa NC com comentários

O ideal seria a correção dos elementos geométricos em sua forma canônica, a despeito de considerações de comunicação e tempo de realimentação, o que levaria a uma independência em relação às considerações de movimentação de ferramenta. Contudo, devido as dificuldades encontradas para se manipular o arquivo de formas canônicas do sistema APT/EXAPT, que para serem transpostas necessitariam do suporte do fabricante, esta possível solução não será analisada.

Assim, a solução adotada é pela adoção do arquivo do programa NC com comentários e todo o desenvolvimento apresentado a seguir é baseado nessa opção.

3.5 REQUISITOS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO EM AMBIENTE CLI

Serão abordados neste tópico os requisitos funcionais, documentais, operacionais e metrológicos necessários ao sistema de medição.

3.5.1 Requisitos Funcionais Para Sistemas De Medição

Na usinagem com tecnologia CNC, toda a movimentação de ferramenta está baseada na definição geométrica de coordenadas de pontos específicos, os quais determinarão em conjunto com o código G, a forma geométrica desejada. Na inspeção geométrica da peça, o sistema de medição deverá ser capaz de fornecer como dado de medição as coordenadas dos pontos correspondentes à usinagem. O processo de medição deverá refletir os pontos que definem a geometria da peça programada. Para se obter este relacionamento,

que deve ser biunívoco, é necessário a mesma definição geométrica, apresentando a mesma identificação, tanto no programa de usinagem quanto no de medição (fig. 3.9). Também devem estar disponíveis as especificações nominais e tolerâncias de fabricação para a determinação do erro dimensional de cada elemento geométrico e as respectivas ações corretivas.

A fim de se conseguir o relacionamento entre o processo de fabricação e o de inspeção é necessário que as coordenadas nominais, definidas na programação da peça, sejam comparadas com as coordenadas reais obtidas pela medição da peça. Para que isto seja viável é necessário ter-se, como resultado da medição os valores reais destas coordenadas/pontos (X,Y,Z) e/ou (I,J,K), que definem a forma/contorno da peça, da mesma maneira que foram definidos na programação NC da peça.

Para atingir este objetivo é imprescindível a utilização de Tecnologia de Medição por Coordenadas que, tal como a tecnologia NC empregada em máquinas-ferramenta, baseia-se na descrição geométrica da peça através de pontos característicos referidos a um sistema de coordenadas, normalmente ortogonal /75/. Estes pontos ideais constituem, por um lado, a base para a preparação do programa de usinagem para a unidade de fabricação, e por outro lado, a base para elaboração do programa de medição destinado ao controle geométrico da peça fabricada.

Na tecnologia de medição por coordenadas, a máquina de medir, o computador e o software formam um sistema completo, cuja a eficiência depende, em muito, do software disponível /76/.

Neste trabalho utiliza-se, como ponto de partida, os softwares básicos já oferecidos pelas CMM's, os quais são programas de medição para elementos geométricos regulares, que fornecem no protocolo de medição os dados de medição e a sua análise com relação à tolerância (fig. 3.13):

- identificação dos elementos geométricos inspecionados (DEN);
- coordenadas X,Y,Z, entre outros parâmetros;
- valor real/medida efetiva (VR);
- valor nominal/medida nominal (VN);

- afastamento superior (TOL S - LTS);
- afastamento inferior (TOL I - LTI);
- erro (E);
- excede (EXC); é a indicação em termos percentuais (0-25, 25-50, 50-75 e 75-100 %) de como VR se localiza na zona de tolerância ou do valor do excesso caso VR exceda os limites, assumindo que LTS e LTI sejam simétricos.

```

=====
DATA: 12.04.1990 NOME-P: CUBO DA RODA DIANTEIRA PEÇA No: 1 - 10 -
ENDIRCH ITAREFA I DEN I SBI MED EFET I MED NOM I TOL S I TOL I I ERRO I EXC
=====

1 SISTEMA COORD COMO POS-P

2 CIRCULO C1X X -40.0422 -40.0000 0.0500 -0.0500 -0.0422 ----
  C1Y Y 31.9621 32.0000 0.0500 -0.0500 -0.0379 ----
  C1D D 29.9882 30.0000 0.0300 -0.0300 -0.0118 --

3 RETA Y 77.9513
  Z -3.5150
  Y/X W1 -0.0372
  Z/X W2 -0.0328

4 RETA Z -3.5281
  X -15.8295
  Z/Y W1 0.0143
  X/Y W2 -0.0899

5 I-PTO RR L1X X -15.9518 -16.0000 0.0500 -0.0500 0.0482 +++
  L1Y Y 77.9617 78.0000 0.0500 -0.0500 -0.0383 ----
  W1 90.1271

=====
APPROVADO ( ) RETRABALHO ( ) REFUGO ( )
DIVISÃO : ASSINATURA :
=====

```

Figura 3.13 - Protocolo de medição - Zeiss /76/

Assim, os requisitos preliminares (detecção de erros) relativos a análise de tolerância, são atendidos pelos softwares básicos disponíveis em CMM's, já realizando uma parte da análise de tolerância necessária para a detecção e/ou identificação de tendências de erros nos elementos geométricos.

3.5.2 Características Metrológicas e Operacionais Exigidas

Para que a CMM não influencie negativamente no CLI com o seu próprio erro é necessário que sua incerteza de medição seja de pelo

menos $1/5$ a $1/10$ da menor tolerância de fabricação da peça produzida, de forma que possa ser considerada desprezível frente as demais fontes de erros /77,78/. Caso contrário, o resultado de medição não poderá ser aplicado para a regulação/controle do processo de fabricação como, tão pouco, para a classificação da peça (boa, refugo ou retrabalho), pois poderia levar uma peça boa a ser considerada refugo ou vice-versa (fig. 3.14),.

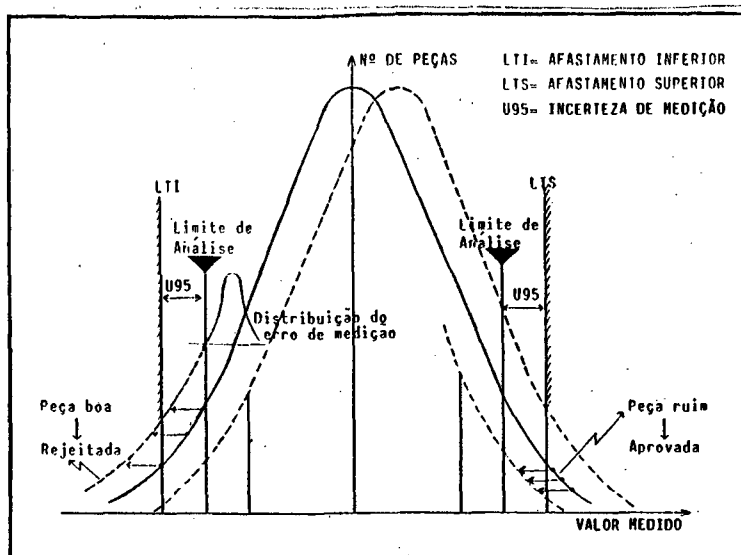


Figura 3.14 - Efeito da incerteza de medição sobre a tolerância dimensional da peça processada /77/

A programação da CMM pode ser efetuada por aprendizagem (na própria CMM) ou "off-line" em uma estação de programação específica /75/. A programação do processo de inspeção deve ser totalmente compatível com a utilizada para a programação da máquina-ferramenta. Assim, deve-se realizar o planejamento dos processos de medição e inspeção em conjunto, para que haja compatibilidade total na:

- . escolha da mesma localização do zero peça de usinagem e do zero peça de medição;
- . escolha de superfícies de referências;
- . identificação/codificação dos elementos geométricos;
- . fixação da peça;
- . entre outros.

O tempo de medição da peça e análise do resultado de medição, pelo software de realimentação, deve ser menor que o tempo requerido para a fabricação da próxima peça ou da próxima amostra de produção que será inspecionada a seguir, a fim de evitar "gargalos" na "linha" de produção devidos a inspeção /79/.

4. PROPOSTA DE UM SISTEMA DE INSPEÇÃO PARA REALIMENTAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Neste capítulo é apresentada a fundamentação de realimentação do processo de fabricação com dados/comandos que otimizam a qualidade dimensional, tendo como base o que foi analisado no capítulo 3. Inicialmente, é feita uma caracterização das fases de produção, com relação aos erros presentes, que possibilitará a distinção das estratégias de correção e ações corretivas que terão lugar. A seguir são descritas as estratégias e ações corretivas, a estrutura do sistema, a configuração física e o modo de operação do sistema como um todo. É deixado para o capítulo 5 o detalhamento dos aspectos técnicos e funcionais do sistema.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE PRODUÇÃO E DOS ERROS PRESENTES

Para possibilitar a análise das fontes de erros e definir as ações corretivas sobre o processo foi implantado como estratégia de correção de erros a divisão do processo, com relação ao momento da usinagem da peça, em duas fases: para peças em "início" de produção e para peças em "ciclo" de produção. Inicialmente, faz-se uma caracterização destas fases e a seguir a sua associação com as fontes de erros passíveis de correção.

A fase INÍCIO de produção (fig. 4.1) é subdividida em: "try-out" e novo lote. O "try-out" trata da correção e otimização de programa NC novo e do ajuste da máquina-ferramenta, dos dispositivos de fixação e das ferramentas, ou seja, da montagem quando se tem um conjunto programa NC/máquina-ferramenta "novos" (ainda não inicializados). Na sub-fase novo lote o programa NC já está ajustado, restando realizar o ajuste da máquina, dispositivos e ferramentas.

Na fase CICLO de produção (fig. 4.1), os meios de fabricação (máquina, dispositivos e ferramentas) e o programa NC já estão devidamente ajustados e liberados para a produção. Os ajustes a serem realizados são contínuos com a finalidade de manter o processo sob controle.

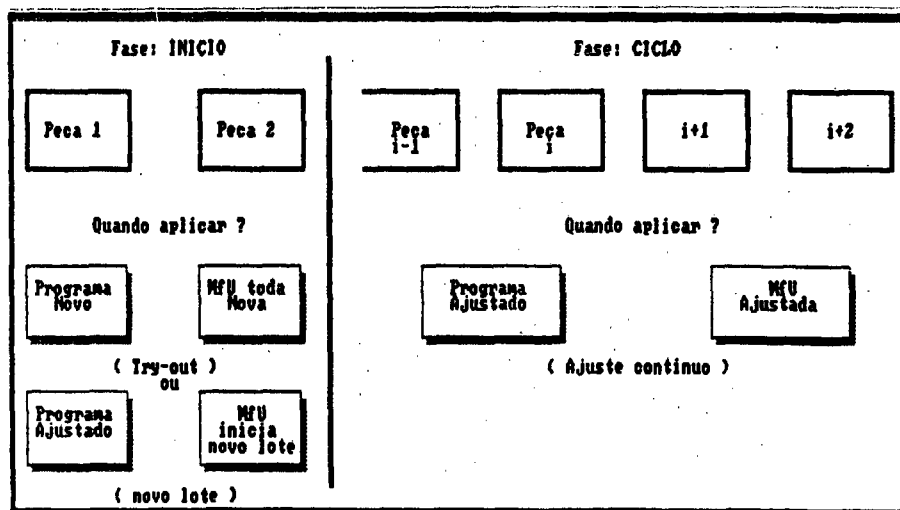


Figura 4.1 - Estratégias de realimentação

Para a realimentação automática, assim como na manual (fig 4.2), é bastante racional a divisão da estratégia de análise, diagnóstico e correções de erros nestas duas fases (fig. 4.1). Para peças em início de produção, os erros mais significativos são devido à programação NC e à desajustes em ferramentas, dispositivos e máquina (erros intrínsecos). Para peças em ciclo de produção, os erros mais significativos são devidos ao processo de usinagem, especialmente, desgaste de ferramenta (erro intrínseco). Além das fontes de erros intrínsecos, certamente estarão presentes em ambas as fases, erros devido a efeitos térmicos (ferramenta, máquina-ferramenta, dispositivos e peça) e erros geométricos da máquina-ferramenta. Neste caso, as suas parcelas estarão superpostas à parcela de erros intrínsecos.

A estratégia de correções para peças em início de produção tem por finalidade ajudar o operador na correção e otimização do programa NC, realizando as alterações necessárias de forma automática, possibilitando a agilização do processo de correções do programa

NC. As correções serão realizadas sobre a parte geométrica, deixando a responsabilidade das alterações das definições tecnológicas a cargo do operador (fig. 4.2). Por outro lado, a estratégia de correções para peças em ciclo tem como meta o controle do processo para evitar refugo e retrabalho.

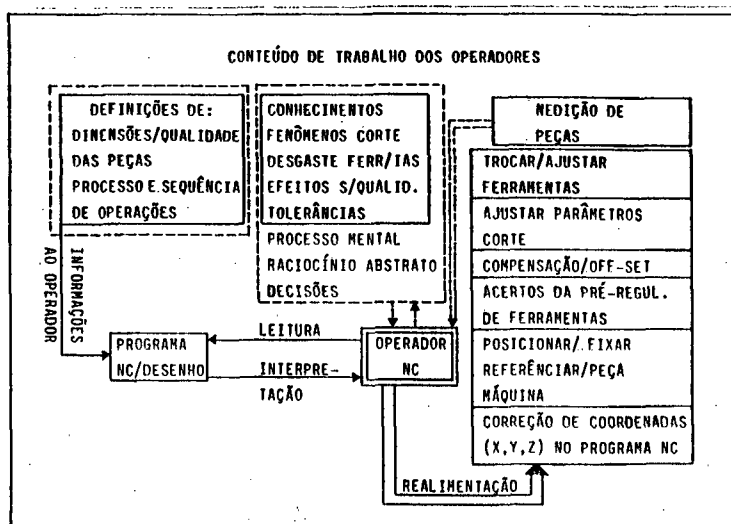


Figura 4.2 - Responsabilidades do trabalho do operador na tecnologia CNC /81/

Para peças em início de produção é necessário um procedimento de inspeção muito mais intensivo do que para peças em ciclo de produção. Isto, devido a necessidade de se ter que inspecionar uma grande quantidade de elementos geométricos da peça para garantir a sua qualidade geométrica. Em alguns casos é necessário realizar uma inspeção completa, fazendo a medição de todos os elementos geométricos que constituem a peça.

O processo de medição e realimentação para peças em ciclo deve ser rápido o bastante para que não comprometa a produtividade da célula, devendo concentrar-se, assim, na verificação das dimensões críticas da peça. Portanto, deve-se utilizar programas de medição diferentes para cada fase de produção. O programa voltado para peças em início de produção deve realizar uma medição mais intensiva, e o outro apenas a medição dos elementos geométricos críticos.

A estratégia de correção para peças em ciclo de produção pode utilizar uma política de inspeção por amostragem ou completa (100%), levando em consideração aspectos referentes ao custo e exigências de tempo para a inspeção/realimentação, a fim de otimizar a produtividade da célula.

4.2 ESTRATÉGIAS E AÇÕES CORRETIVAS

Para se fazer uma distinção das ações corretivas a serem efetuadas, idealmente, apenas sobre os erros de natureza da programação NC e desgaste de ferramenta (erros intrínsecos - item 3.3), é introduzido o conceito de correção por meio de dados "fingidos", no qual são compensados erros sistemáticos e progressivos devidos à máquina e/ou efeitos térmicos, associados ou não aos erros intrínsecos.

A ação corretiva por meio de dados "fingidos" é obtida através de alterações de parâmetros no programa NC ou de dados de ferramenta, como a realizada para os erros intrínsecos.

O que realmente se faz, quando se efetua uma ação corretiva, é a correção do erro global independentemente de sua natureza, interessando na realidade o valor da correção do erro determinado pela medição da peça. Por exemplo, quando se faz a correção de erros devido a desgaste de ferramenta pode-se, indiretamente, estar corrigindo erros causados por efeitos térmicos que, normalmente, representam cerca de 60-70% do erro presente /57/, e também erros geométricos referentes à máquina-ferramenta. Assim, na correção de desgaste de ferramenta e/ou efeitos similares (temperatura), a correção do erro é efetuada de forma total, desconhecendo-se as parcelas de contribuição de cada fonte de erro.

O sistema de realimentação da qualidade proposto apresenta, como estratégias de análise e correção automática de erros geométricos em peças usinadas (fig. 4.3), a detecção/prevenção do erro de forma global (análise de tolerância), a sua análise e a correção do processo (análise de manufatura), para estabelecer ou restabelecer a qualidade das peças produzidas, por meio de:

- Ações corretivas para peças em início de produção:
 - correção através do programa NC (coordenadas que definem o elemento geométrico, zero peça ou dados de ferramenta), onde o erro detectado é causado por falhas de programação de definições geométricas e desajuste da máquina/processo;
 - correção por dados "fingidos" (idem correção através do programa NC).
- Ações corretivas para peças em ciclo de produção:
 - correção através de dados de ferramenta, onde o erro detectado é causado por desgaste de ferramenta e efeitos similares (temperatura);
 - correção por dados "fingidos" (idem correção através de dados de ferramenta).

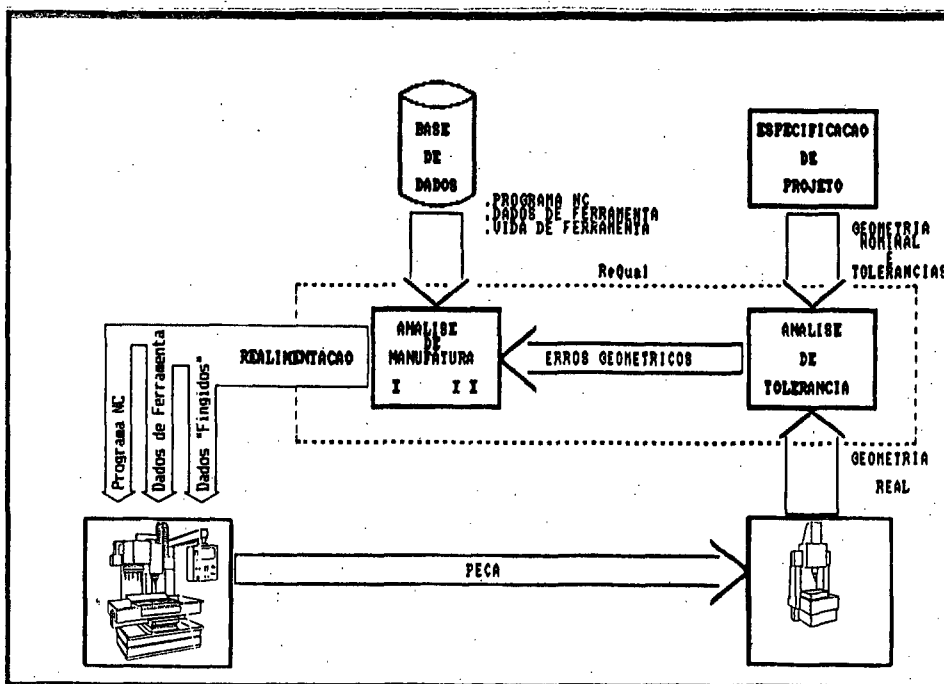


Figura 4.3 - Sistema de realimentação da qualidade - ações corretivas e módulos básicos

4.3 ESTRUTURA DO SISTEMA

O sistema de inspeção em malha fechada concebido é designado por ReQual (Realimentação da Qualidade), dividindo-se em três módulos básicos (fig. 4.3), sendo suas funções:

- Análise de Tolerância
 - . determinação dos elementos geométricos com erro
- Análise de Manufatura I
 - . determinação das ações corretivas para peças em início de produção
- Análise de Manufatura II
 - . determinação das ações corretivas para peças em ciclo de produção

A seguir são apresentados, a nível macro, os aspectos relevantes de cada módulo do sistema. Antes de proceder esta apresentação é introduzido um fluxograma que descreve a filosofia de realimentação (fig. 4.4), que dará subsídio às análises que se seguirão.

4.3.1 Análise de Tolerância

Todos os elementos geométricos a serem inspecionados são identificados, sendo esta identificação compatível com a definição geométrica do elemento correspondente no programa NC. A inspeção da peça, efetuada pela CMM (fig. 4.4), fornece através do seu protocolo de medição o valor do erro e a análise do valor medido (parâmetro Excede), situando a medida, em termos percentuais, em relação aos afastamentos superior e inferior (fig. 4.5a). O protocolo de medição, contendo estes valores e outros (fig. 3.13 e fig. 3.14), é transferido para o software ReQual onde procede-se a segunda parte da análise de tolerância. Nesta, faz-se a organização e o armazenamento dos elementos geométricos em uma matriz de erros geométricos (fig. 5.5), de acordo com a análise de manufatura que se irá realizar e tendo como base o valor do parâmetro Excede. Para a análise de manufatura I, são armazenadas informações sobre os elementos geométricos que ultrapassem o limite de 75% do parâmetro Excede (fig. 4.5a). O valor de correção é calculado por (4.1):

$$C = -\{[(LTS-LTI)/2]+E\} \quad (4.1)$$

onde: $E = VR - VN$

LTS = afastamento superior

LTI = afastamento inferior

VR = valor real (Dr - dimensão real)

VE = valor nominal (Dn - dimensão nominal)

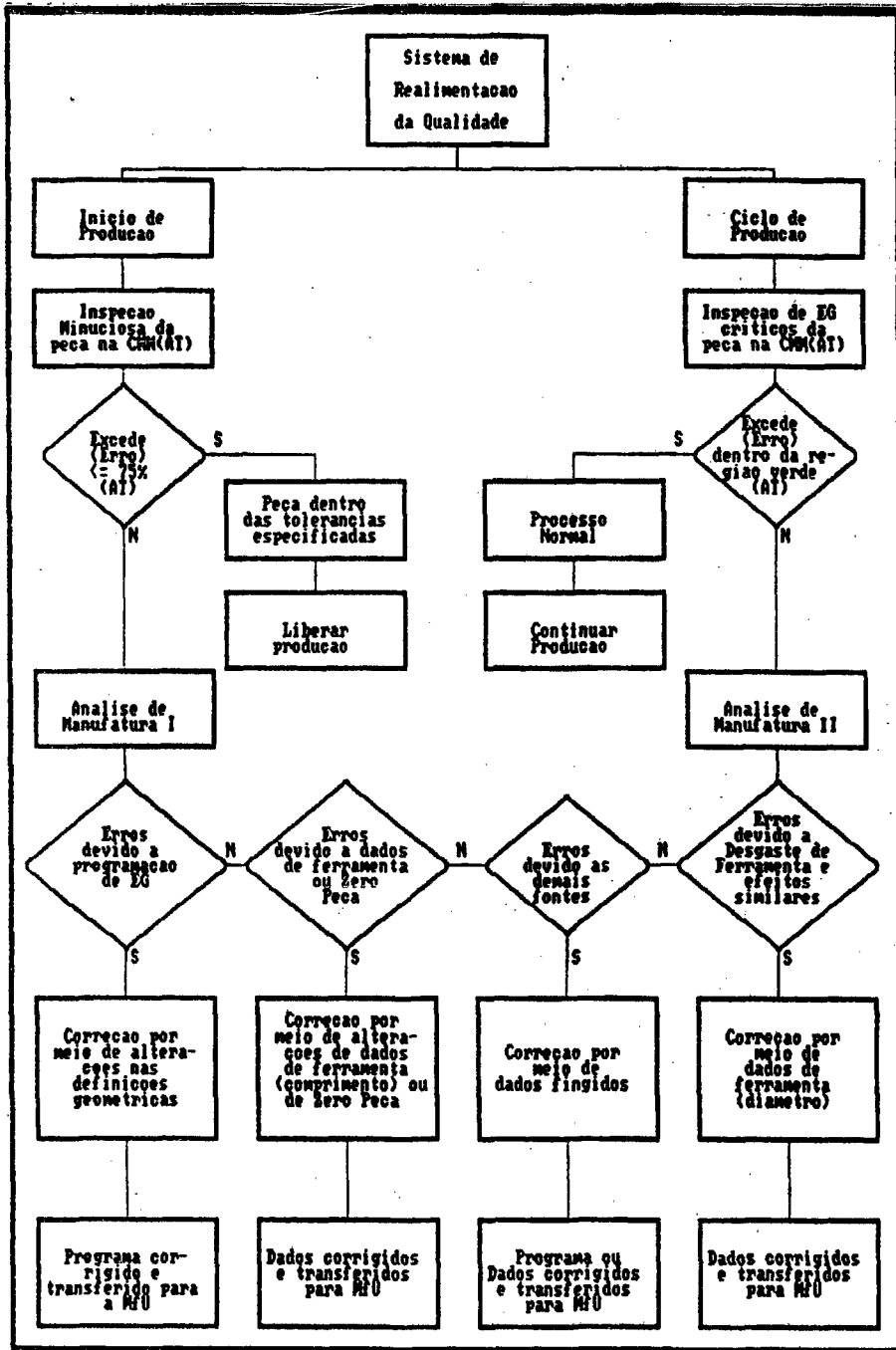


Figura 4.4 - Opções de realimentação

Para a análise de manufatura II é necessário o armazenamento de todos os dados do protocolo de medição (inspeções passadas e presente) na matriz de erros geométricos, independentemente do valor do parâmetro Excede. Isto é necessário, pois utiliza-se de técnicas de controle estatístico de processo para efetuar a análise de manufatura II, o que requer o histórico da análise de

tolerância. O valor da correção é calculado também pela relação descrita em (4.1).

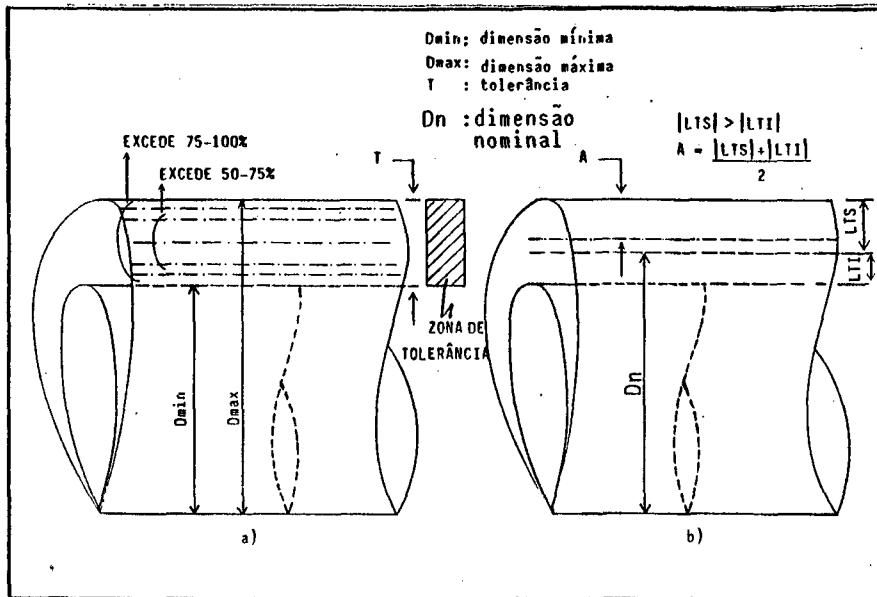


Figura 4.5 - Zona de tolerância

Esta abordagem através da utilização do parâmetro Excede é a mais conservadora e segura que se tem, por garantir/forçar, independentemente dos valores dos afastamentos superior e inferior, a centralização da dimensão corrigida na zona de tolerância (fig. 4.5b).

4.3.2 Análise de Manufatura I (Peças em Início de Produção)

A análise de manufatura I (AMI) refere-se à estratégia de correção para peças em início de produção (fig. 4.4). As ações corretivas são divididas em três grupos de correções: correções sobre definições de coordenadas e parâmetros do programa NC, correção de zero peça e correção de comprimento de ferramenta.

No primeiro caso, os erros são localizados e as correções (localizadas) ocorrem sobre as coordenadas (X,Y,Z,I,J e/ou K) que definem a movimentação de ferramenta em conjunto com G00, G01 ou G02/G03 ou sobre alguns parâmetros de ciclos fixo e sub-rotinas (programação paramétrica), de determinado elemento geométrico.

A correção de zero peça ocorre quando os erros dimensionais, de determinada coordenada (X,Y ou Z), da maioria dos elementos geométricos são da mesma ordem de grandeza e apresentam a mesma direção de propagação, sempre positivos ou negativos. A correção apresenta um caráter global, abrangendo todos os elementos geométricos para a coordenada analisada.

Correções de comprimento de ferramenta ocorrem quando os erros relacionado à coordenada "Z", referentes a alguns planos de trabalho de determinada ferramenta, são da mesma ordem de grandeza e apresentam a mesma direção de propagação. O efeito da correção é local afetando somente a ferramenta corrigida, diferente da correção de zero peça (para a coordenada "Z") onde ocorre uma correção global afetando todos o elementos geométricos.

4.3.3 Análise de Manufatura II (Peças em Ciclo de Produção)

A análise de manufatura II refere-se à estratégia de correções para peças em ciclo de produção (fig. 4.4). As ações corretivas baseiam-se na atualização dos dados referentes ao diâmetro de ferramenta (fresamento) e na detecção e mesmo prevenção de um desgaste de ferramenta excessivo (fresamento e furação), informando a necessidade de troca de ferramenta ou interrompendo o desenrolar do processo de fabricação /83,84/, caso os erros devido à desgaste de ferramenta sejam os mais significativos dentre as fontes de erros presentes. Esta análise fundamenta-se em um acompanhamento da evolução, ao longo do tempo, de uma ou mais (média) dimensões/coordenadas, associando-as a uma determinada ferramenta. Isto é feito para todas as ferramentas de interesse /83/. Assim, cada operação de usinagem é associada a um par ferramenta/dimensão de um ou mais (média) elementos geométricos característicos. Como critério de fim de vida de ferramenta /85,86,87/ adota-se, teoricamente, o tempo de utilização de ferramenta calculado indiretamente a partir de (4.2) :

$$n_p = T/t_u \quad (4.2)$$

onde: n_p = número de peças para ocorrer troca de ferramenta

T = vida de ferramenta (min)

t_u = tempo de usinagem por ferramenta por peça (min/peça)

Tendo-se esta associação disponível utiliza-se o conceito de pré-controle /49,84/, a fim de monitorar e controlar o processo de usinagem.

Utiliza-se princípios de pré-controle, como técnica de acompanhamento estatístico de processo, e não cartas de controle (X-R ou X-SIGMA) em função de:

- ter como pré-requisito, para a análise de fontes de erros, uma capacidade do processo (6SIGMA) que não deve exceder o valor da tolerância estabelecida /46,47/. Ocorrendo isso, tem-se certeza que os erros aleatórios do processo/máquina são inferiores à tolerância de trabalho;
- trabalhar com pequenos e médios lotes com grande variedade de peças, onde se tem disponível uma menor quantidade de amostras, sendo indesejável para a adoção de cartas de controle /46/.

A aplicação de pré-controle é normalmente usada no ajuste/montagem para inicializar um novo lote e durante o ciclo de produção /46,49/, sendo baseada em duas regras básicas:

- a) AJUSTE, será aprovado, quando um conjunto de cinco peças consecutivas estiverem dentro da "região verde" (fig. 4.6);
- b) PRODUÇÃO, numa amostra de duas peças consecutivas, tem-se :
 - se a 1ª peça está dentro da área alvo ("região verde"), não é necessário medir a segunda;
 - se a 1ª peça está fora da área alvo, checar a segunda;
 - se a 2ª peça está dentro da área alvo, continue a produção;
 - se ambas as peças estão fora da área alvo, ajuste o processo e retorne para a primeira regra.

O fundamento estatístico/probabilístico para o procedimento de pré-controle /47/, baseia-se na probabilidade de que 1 em 14 peças (7%) poderá estar dentro de uma das duas "zonas amarelas" e de que 12 em 14 peças (86%) estará dentro da "zona verde"; desde de que o processo apresente uma distribuição de frequência normal (fig. 4.6). Assim, a probabilidade de duas peças consecutivas estarem nas "zonas amarelas" é de 1 em 196 ($1/14 \times 1/14 = 1/196$), indicando que o processo, realmente, está fora/saindo de controle.

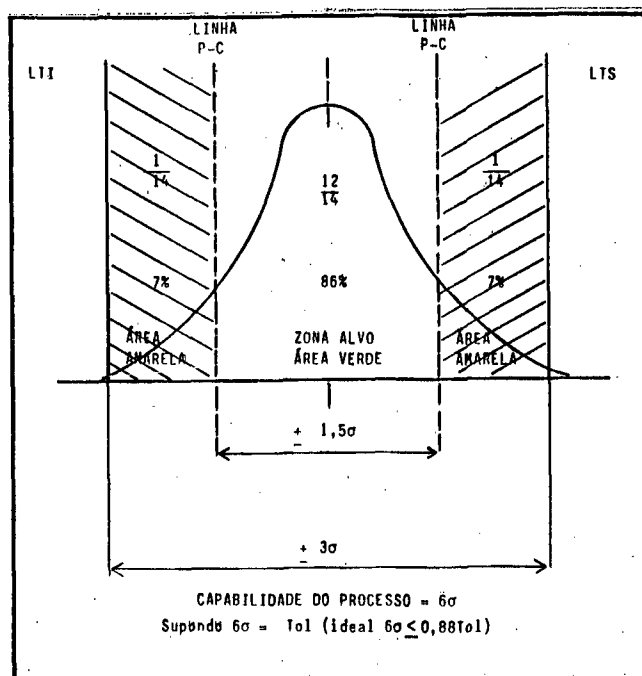


Figura 4.6 - Técnicas de pré-controle /47/

No capítulo cinco descreve-se o procedimento utilizado para controle estatístico de processo, o qual é baseado em técnicas de pré-controle utilizando-se de algumas variações, para melhor aproveitar os recursos disponíveis (protocolo de medição e facilidades de manipulação de dados) e para trabalhar com limites de disparo de correções maiores.

4.4 CONTEXTO FÍSICO ONDE SE INSERE O SISTEMA ReQual

A configuração física (equipamentos) na qual se insere o ReQual (fig. 4.7) é formada por uma unidade CAQ (Computer Aided Quality) que realiza a análise e correção automática de erros, uma unidade de inspeção (IpU), uma estação CAD/CAM e unidades de fabricação (MfU's). A unidade CAQ é composta por um computador tipo PC/XT e o software ReQual. A estação CAD/CAM é composta por um sistema de programação NC. A unidade de inspeção é formada pela CMM e o seu controlador (CMMC).

O desejável é a conexão dos equipamentos via rede local de comunicação /3,88/, estando a unidade CAQ ligada a um dos nós da

rede (fig. 4.7) não sendo conectado de forma rígida às unidades de controle da MT e da CMM. A unidade CAQ não teria o controle direto sobre estes equipamentos, mas estaria subordinada ao controlador da célula (unidade de gerenciamento - MgU). A MgU faria toda a parte de supervisão e controle da célula de fabricação, interagindo quando necessário com a unidade CAQ para realizar a realimentação.

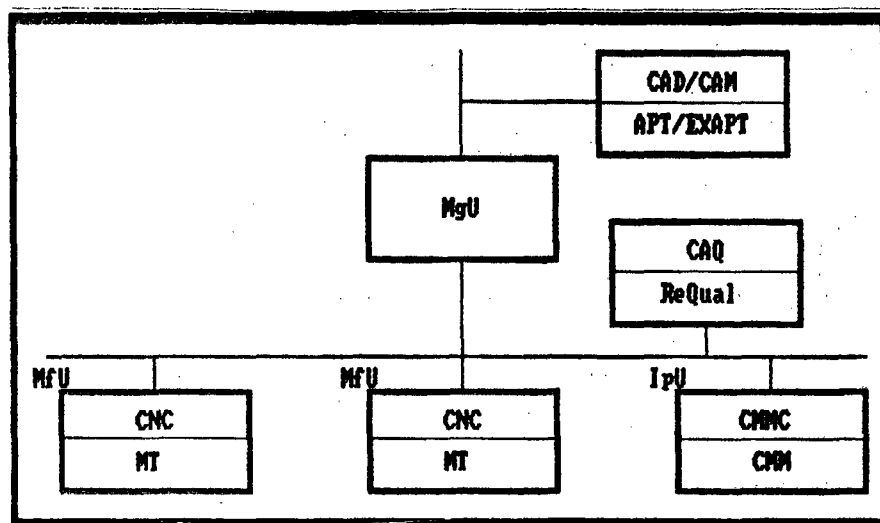


Figura 4.7 - Configuração desejável para integração física dos equipamentos

4.5 MODO DE OPERAÇÃO

A figura 4.8 apresenta globalmente a filosofia de realimentação proposta, mostrando a interação nos/entre níveis de administração (Planejamento do Produto, Processo e Produção - 4P) e operacional.

A partir do projeto da peça, faz-se o planejamento da programação NC dos processos de fabricação e inspeção (MIPPTM), em conjunto, a fim de compatibilizá-los em relação a identificação dos elementos geométricos (EG's), definição de zero peça, superfícies de referências, sequência de usinagem e medição, entre outros. Estas definições são realizadas, normalmente, na etapa do planejamento de processos (CAPP ou convencional) /89/.

A seguir, inicia-se o processo de programação NC da peça, em EXAPT ou APT, a ser usinada; tendo como saída dois arquivos: programa NC com comentários e programa NC só com o código G. Paralelamente, executa-se a programação "off-line" ("NC") da peça, fornecendo dois programas de medição a serem utilizados na máquina de medir por coordenadas, um para peças em início de produção e outro para peças em ciclo de produção.

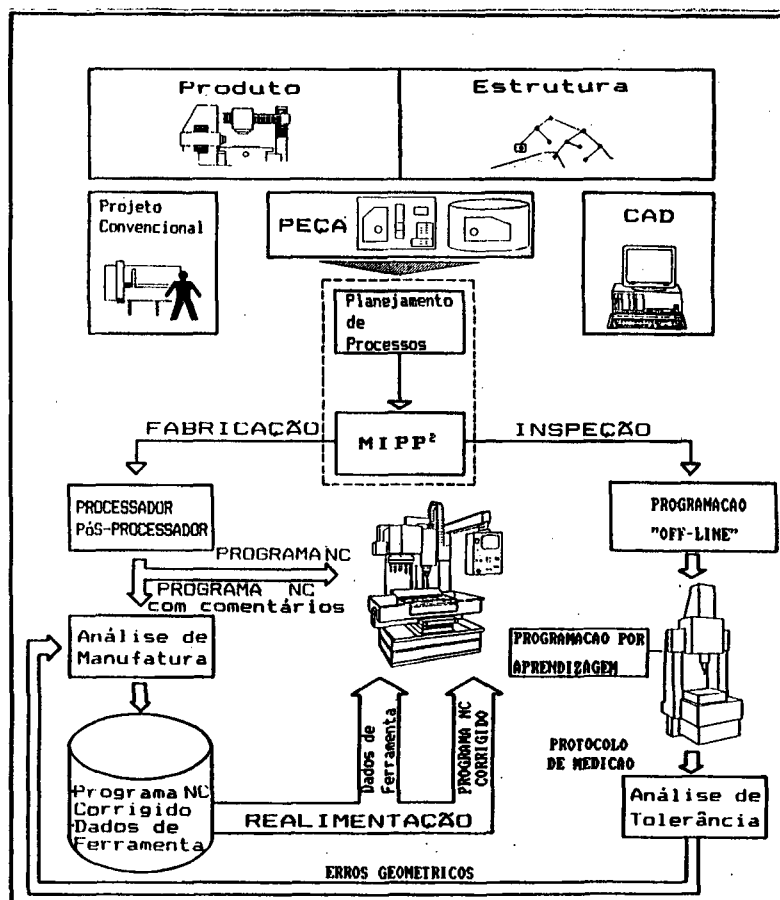


Figura 4.8 - Arquitetura para operacionalização do sistema de realimentação proposto

O programa NC com comentários é transferido para a estação de análise e correção de erros (CAQ) e o programa NC (só o código G) para a unidade de fabricação (MfU), a fim de inicializar a produção da peça. Após a usinagem, a peça é transferida para a máquina de medir por coordenadas (CMM), onde se executa a sua inspeção utilizando-se do programa de medição para início de produção, já disponível. Caso não se tenha um sistema de programação "off-line", realiza-se a programação NC da peça por aprendizagem na própria

CMM, de acordo com o pré-estabelecido no MIPP[™], gerando os programas para peças em início e ciclo de produção.

A seguir é realizada a medição da peça em início de produção ("try-out" ou novo lote), e o seu protocolo de medição (parte da análise de tolerância) é transferido, de forma automática ou manual para a CAQ, que procede o restante da análise de tolerância.

Na sequência, a análise de manufatura I (AMI) realiza as devidas correções sobre os EG's inconsistentes no programa NC com comentários (programa em "try-out") ou realiza os ajustes apropriados sobre dados de ferramenta (comprimento) e zero peça (nova série ou "try-out"), de acordo com a estratégia adotada. A seguir, no caso de programa em "try-out", faz-se a filtragem deste programa (programa NC com comentários corrigido), deixando-o livre dos comentários, armazenando-o e transferindo-o para a MfU.

Faz-se, agora, a usinagem de uma nova peça e a seguir verifica-se a validade das correções realizadas através de nova medição para peças em início de produção. Em caso de sucesso, libera-se a peça para a etapa ciclo de produção. Caso contrário, será necessário uma análise mais minuciosa por parte do operador, pois, provavelmente, existe algum desajuste de natureza não tratada pela metodologia (rigidez da fixação, condições tecnológicas de usinagem, entre outros). Além disso, o sistema deve oferecer facilidades para que o usuário/operador verifique a consistência das correções efetuadas, tanto para a AMI quanto para a AMII.

Para peças em ciclo de produção (AMII), o programa em código G e a unidade de fabricação já estão otimizados, e as ações corretivas que terão lugar são realizadas sobre dados de ferramenta, interrupção do processo e troca de ferramenta. O programa de medição utilizado na CMM é para peças em ciclo de produção, a fim de diminuir o tempo de medição/realimentação.

Deve-se ter um arquivo de dados de ferramenta na CAQ espelho do utilizado no CNC. O arquivo espelho da CAQ sempre é atualizado, quando as correções são efetuadas. O controle do processo é realizado através da utilização de técnicas baseadas em pré-

controle. Para possibilitar esta análise o sistema ReQual deve ser informado, também, sobre:

- tempo de utilização de cada ferramenta;
- ferramentas com mais de uma definição de dados de ferramenta (dados compartilhados, duas ou mais definições de diâmetro de fresa para uma única ferramenta - valores real e fictícios).

5. CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS E FUNCIONAIS DOS MÓDULOS DO SISTEMA ReQual

Neste capítulo são apresentados os aspectos tecnológicos e funcionais para a Análise de Manufatura I (AMI) e para a Análise de Manufatura II (AMII). Na AMI são tratados os aspectos relativos às definições geométricas da linguagem de programação automática NC, apresentando uma série de identificadores distintos para pontos, linhas, circunferências, etc; e dirigido para correções sobre o programa NC, comprimento de ferramenta e zero peça. Na AMII, os identificadores estão restritos, apenas, à natureza do processo (fresamento ou furação/correlatos) relacionando a ferramenta (processo/operação) a um ou vários elementos geométricos (EG's) específicos, que tratam da correção sobre diâmetro de ferramenta, troca de ferramenta e outros. A Análise de Tolerância (AT) realizada pela CMM (protocolo de medição) e ReQual é descrita, concomitantemente, nos relatos realizados para a AMI e AMII.

5.1 IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS NA AMI E AT ASSOCIADA

Cada elemento geométrico (ponto, linha, plano, circunferência, entre outros), necessário para a definição geométrica da peça na programação NC em alto nível, é identificado e codificado de modo particular, sendo esta identificação/codificação associada a utilizada no protocolo de medição.

5.1.1 Aspectos Referentes às Definições Geométricas Em EXAPT/APT Relacionados a Medição da Peça

Inicialmente, divide-se a identificação em dois grandes grupos: identificadores para o processo de furação/correlatos e para o processo de fresamento. Estes, por sua vez, são divididos em dois sub-grupos relacionados às:

- declarações básicas da programação NC:
 - . ponto/posicionamento (avanço rápido)
 - . "paterñ"/ciclo fixo (padrão/grade de furação)
 - . sub-rotina
 - . "macro"
 - . circunferência/interpolação circular
 - . linha/interpolação linear
- declarações especiais da programação NC:
 - . "Index"/"copy" (translação, rotação, espelhamento e outros); disponível no APT e EXAPT.
 - . "Tracut"/"Matrix" (espelhameto, translação, rotação, etc); disponível no APT.
 - . "Matrix"/"Transl" (translação e rotação); disponível no EXAPT.

As declarações, chamadas neste trabalho de especiais, são funções que permitem a obtenção de uma nova movimentação de ferramenta, a partir de uma transformação (translação, espelhamento, rotação, outras) definida por uma declaração "matrix" ou por meio de uma declaração "copy" na etapa de definições geométricas. Assim esta transformação, efetuada sobre as declarações básicas marcadas, é realizada pelo processador APT/EXAPT, a partir das definições geométricas e de movimentação realizadas, esta sim, formalmente pelo programador, gerando o código G.

No programa NC com comentários, de agora em diante designado apenas por programa NC (fig. 3.11), a identificação geométrica referente às declarações especiais será a mesma que as declarações básicas. Portanto, tem-se no programa NC estas declarações misturadas e para separá-las é necessário a utilização da função "Pprint", durante a programação em alto nível (fig. 5.9), a fim de gerar os comentários necessários no programa NC, tais como: início de transformação e fim de transformação para o processo de furação e também para o fresamento.

Para que seja possível a distinção desses diversos EG's na interpretação do protocolo de medição pelo processador de correções é necessário que sua codificação seja distinta para as declarações

básicas e especiais a nível de protocolo de medição, já que, a nível do programa NC, eles são iguais, e para possibilitar sua identificação/separação utiliza-se de comentários na programação em alto nível, como descrito acima.

A fim de interferir o menos possível na filosofia de programação corrente, utilizar-se-á dos mesmos mnemônicos para associar as definições geométricas com os identificadores. Assim, durante a programação NC, as definições geométricas das declarações básicas são identificados por:

- Ponto: codificado com P + sequência de números
- "Patern": codificado com R + sequência de números
- Linha: codificado com L + sequência de números
- Circunferência: codificado com C + sequência de números.

5.1.2 Aspectos Referentes À Movimentação de Ferramenta Para APT/ EXAPT Associados À Identificação dos Elementos Geométricos

Na programação de operações de furação/correlatas (ponto a ponto) o dado mais importante, referente ao posicionamento, são as coordenadas do centro do furos e, normalmente, estes são identificados pelos mnemônicos "P" e "R".

Nas operações de fresamento, trajetória contínua, a movimentação de ferramenta dá-se ao longo de superfícies de referências, sendo estas representadas por linhas e circunferências, normalmente identificados por "L" e "C", respectivamente. Quando estas definições geométricas são relacionadas entre si, através da definição de movimentação, obtêm-se a geometria/contorno desejado para a peça.

As definições de movimentação são diferentes quando utiliza-se APT ou EXAPT. A seguir são feitas algumas considerações sobre estas definições, a fim de facilitar a compreensão dos parágrafos seguintes:

- Em APT a ferramenta é considerada um cilindro complexo /68,69/, que se movimenta sobre uma superfície (fig. 5.1.a) denominada PS ("part surface"), tangenciando ao longo de outra

superfície DS ("drive surface") até uma 3ª superfície CS ("check surface").

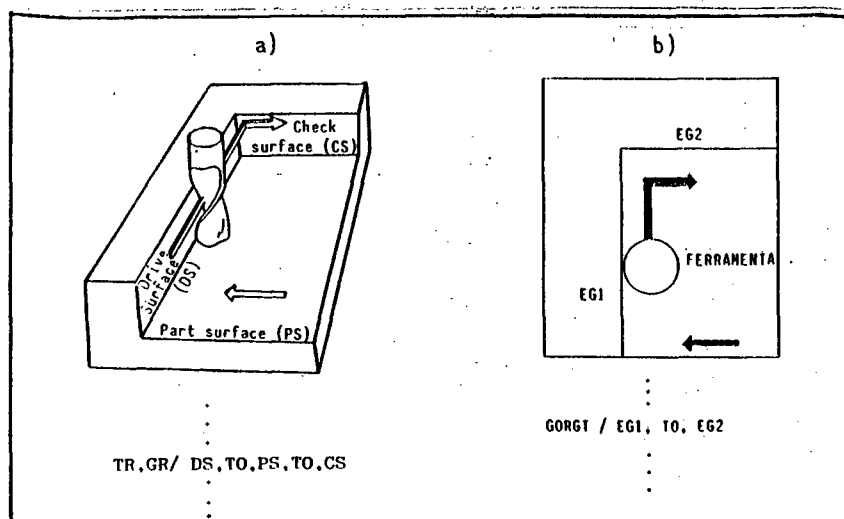


Figura 5.1 - a) Superfícies de referência na programação APT /65/
b) Planos de movimentação e referência em EXAPT

- Em EXAPT, a movimentação de ferramenta dá-se em duas direções de um plano pré-estabelecido, determinado por uma declaração, anterior, de posicionamento. Não existe, quando comparado ao APT, a figura destas três superfícies (fig. 5.1.a) e sim de um plano de movimentação (EG1) e um plano de referência (EG2), sendo que a ferramenta é deslocada de acordo com o seu posicionamento (declaração anterior de posicionamento) ao longo de EG1 (plano de movimentação) até EG2 (plano de referência) se existir, ou então é limitado automaticamente por uma declaração de movimento subsequente. A figura 5.1.b mostra a mesma movimentação, referente ao EXAPT. Em analogia com APT, pode-se dizer que o EG1 é a DS e o EG2 é a CS.

Os EG's de interesse são as superfícies DS ou CS para o APT, e os planos de movimentação (EG1) e de referência (EG2) para o EXAPT. Normalmente já estão disponíveis no "campo" referente a identificação geométrica, no programa NC, a superfície DS (APT) e o plano de movimentação/EG1 (EXAPT), os quais relacionam a movimentação de ferramenta com a definição geométrica que a originou, não sendo necessário alterações nas rotinas do pós-processador. Além disso, não se muda a metodologia de identifica-

ção dos elementos geométricos na programação NC, pois esta continua sendo feita a partir da "drive surface" (DS) ou do plano de movimentação (EG1), ou seja, o sistema não obriga a mudança de atitudes dos programadores quanto a este aspecto.

5.1.3 Relacionamento Movimentação d'Ferramenta/Protocolo de Medição

Nas operações de fresamento deve-se relacionar, para uma dada movimentação de ferramenta, a identificação de uma superfície DS (APT) ou um plano de movimentação (EXAPT) à coordenada que limita esta movimentação. Assim, no protocolo de medição, este EG ("L" ou "C") representa a coordenada de chegada da movimentação de ferramenta (fig. 5.2), e na programação NC representa a linha ou a circunferência definida.

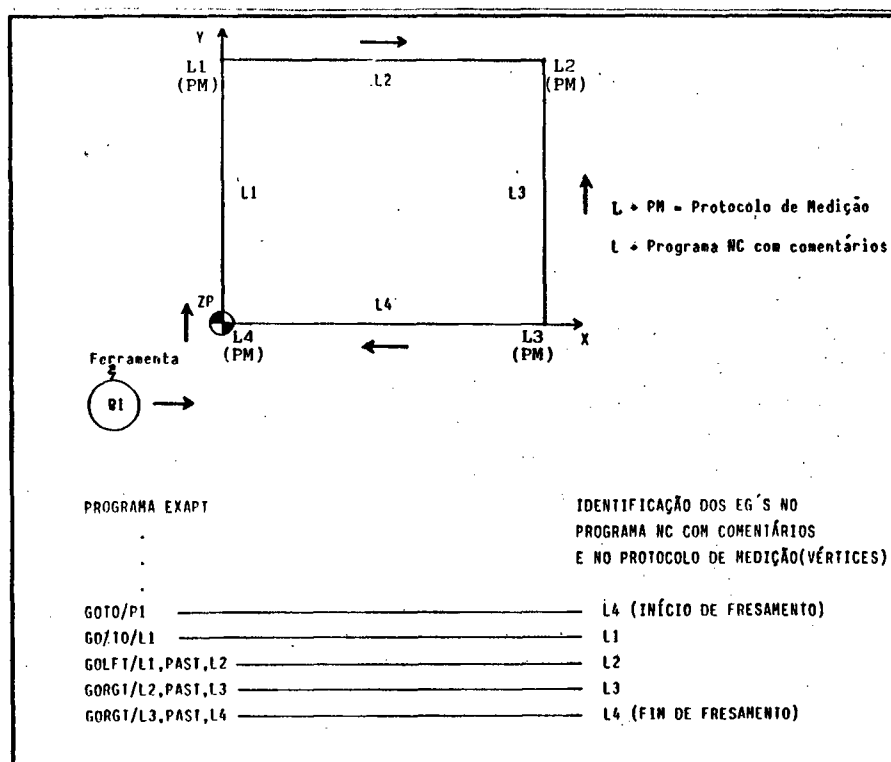


Figura 5.2 - Identificação para operações de fresamento - EXAPT

Para as operações de furação/correlatas a definição geométrica é muito simples (movimentação ponto a ponto), facilitando em muito, sua identificação e relacionamento com o protocolo de medição. Assim, têm-se a identificação de ponto já disponível no programa NC

tanto em APT quanto em EXAPT. Contudo, um "patern" normalmente não vem referenciado no campo de identificação de elementos geométricos do programa NC sendo, portanto, necessário utilizar comentários no programa em alto nível, a fim de viabilizar o relacionamento protocolo de medição/programa NC. Para se obter este relacionamento é necessário a introdução de comentários através da declaração "PPrint". Uma outra opção, seria fazer a alteração da saída deste relatório, fazendo constar um identificador referente a esta declaração, necessitando adaptar as rotinas que controlam a saída de relatórios.

A figura 5.3 apresenta a identificação no programa em alto nível e no protocolo de medição/programa NC para operações de furação/ correlatas (APT).

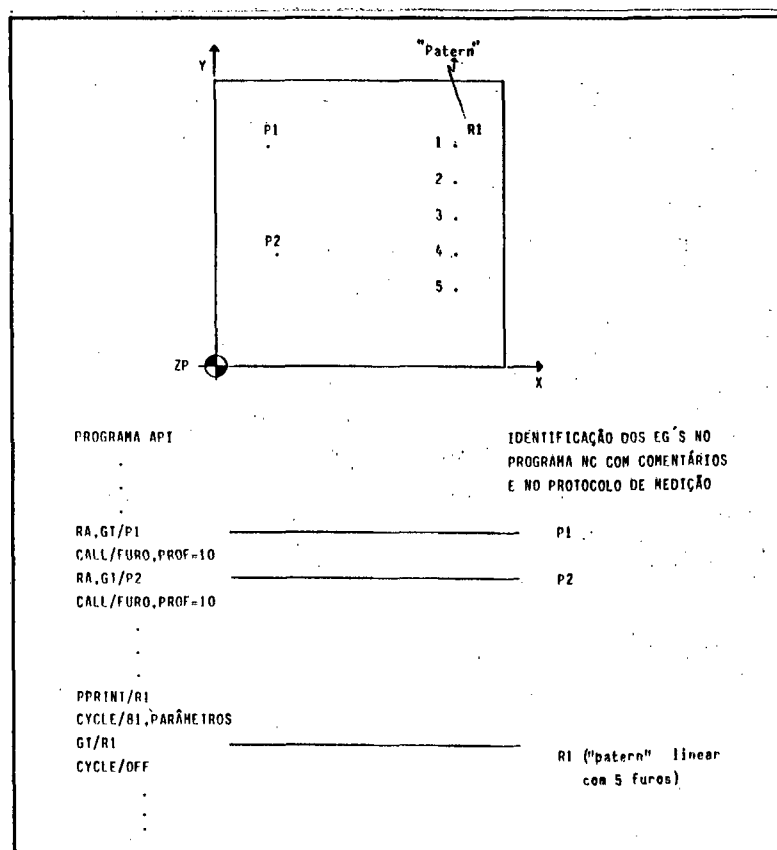


Figura 5.3 - Identificadores para operações de furação - APT

5.1.4 Definição da Codificação dos Identificadores Para o Protocolo De Medição e Para o Programa NC

A fim de se fazer uma compatibilização total na codificação destes elementos geométricos é necessário saber qual é o número máximo de caracteres alfanuméricos aceitos por estes campos de identificação, tanto no protocolo de medição, quanto na programação NC em alto nível e no programa NC. Assim, tem-se nos sistemas utilizados a seguinte disponibilidade:

- protocolo de medição da CMM
 - . 5 caracteres alfanuméricos
- Programa NC e programação NC em alto nível
 - . 4 caracteres alfanuméricos

A codificação do programa NC será composta por um carácter alfabético (P, L ou C) e os outros três serão utilizados na numeração do elemento:

- todas as declarações básicas e especiais, por exemplo: P200
 - . P tipo de identificação (P,L,C)
 - . 200 n^o do elemento geométrico

Cada tipo de identificador poderá ter até 200 elementos geométricos, sendo válido para todos os tipos de identificadores. Além disso, deve-se introduzir comentários antes e ao final do trecho de programação que sofrerá alguma transformação, assim tem-se:

- Comentário para furação (Declarações especiais)
 - . Ti onde i é o n^o da transformação (início de furação)
 - . FTi onde i é o n^o da transformação (fim de furação)
- Comentário para fresamento (Declarações especiais)
 - . Mi onde i é o n^o da transformação (início de fresamento)
 - . FMi onde i é o n^o da transformação (fim de fresamento)

Além destes, a codificação dos elementos no protocolo de medição da CMM terá mais alguns códigos para identificação de parâmetros essenciais, a fim de associar o protocolo de medição ao programa NC, que são:

- tipo de coordenada (X,Y,Z) do EG inspecionado;
- n^o da transformação.

Assim, de um campo disponível de, no máximo, 5 caracteres alfanuméricos, tem-se a seguinte codificação para o protocolo de medição:

- para declarações básicas, exceto "patern", por ex. P200Y:
 - . Y tipo de coordenada (X,Y,Z ou D)
 - . 200 nº do EG
 - . P tipo de identificador (P,L,C,O ou I)
 - P = ponto (X,Y,Z)
 - L = linha (X,Y,Z)
 - C = circunferência (X,Y,Z)
 - I = início de fresamento (X,Y,Z)
 - O = circunferência (coordenadas do centro (X,Y,Z) e diâmetro)
- para "patern", por ex. R420Z:
 - . Z tipo de coordenada (X,Y ou Z)
 - . 20 nº do furo dentro da sequência de furos
 - . 4 nº do EG ("patern")
 - . R tipo de identificador (R)
- referente à declarações especiais, exceto para "patern", por ex. A315Y:
 - . Y tipo de coordenada (X,Y,Z ou ,D)
 - . 15 nº do EG
 - . 3 nº da transformação
 - . A tipo do identificador (T,E,A,S ou Q)
 - T = ponto (X,Y,Z)
 - E = linha (X,Y,Z)
 - A = início de fresamento (X,Y,Z)
 - S = circunferência (X,Y,Z)
 - Q = circunferência (coordenada do centro (X,Y,Z) e diâmetro)
- referente à declarações especiais com "patern", por ex. U875Z:
 - . Z tipo de coordenada (X,Y ou Z)
 - . 5 nº do furo dentro da sequência de furos
 - . 7 nº da transformação
 - . 8 nº do EG ("patern")
 - . U tipo do identificador (U)

A Figura 5.4 apresenta uma compilação dos EG's e seu relacionamento com o programa NC. Nesta figura, também aparece um terceiro grupo de identificadores relacionado com dados de ferramenta, mais especificamente, comprimento de ferramenta. Estes elementos ("TL"),

associam diversas coordenadas Z a um ou vários planos de trabalho de uma determinada ferramenta. Estes EG's só aparecem no protocolo de medição e seu relacionamento não é propriamente com o programa NC, mas sim, com dados de ferramenta. Sua codificação tem o seguinte significado, por ex. TL153:

- . 3 n^o de coordenadas para análise (de 1 a 5)
- . 15 n^o de ferramenta
- . TL tipo de identificador (TL - comprimento de ferramenta)

CARACTERÍSTICAS PROCESSO	CLASSE DE DECLARAÇÃO	IDENTIFICADORES	
		PROTOCOLO DE MEDIÇÃO (PM)	PROGRAMA NC COM COMENTÁRIOS
F U R A C A O	B Á S I C A	PONTO (SUB-ROTINA)	P
	P A T E R N (CICLO FIXO)	R	COMENTÁRIO R INTRODUZIDO PELO PROGRAMADOR
	E S P E C I A L	PONTO (SUB-ROTINA)	INÍCIO COM T e FINALIZA COM FT
	P A T E R N (CICLO FIXO)	U	P COMENTÁRIO U INTRODUZIDO PELO PROGRAMADOR
F R E S A M E N T A D O	B Á S I C A	INÍCIO DE FRESAMENTO	I
	S I S T E M A	INTERPOLAÇÃO LINEAR	L ou C
	C I R C U L A R	INTERPOLAÇÃO CIRCULAR	L
	E S P E C I A L	INÍCIO DE FRESAMENTO	C e C ou C e L
	P A T E R N (CICLO FIXO)	A	INÍCIO COM M e FINALIZA COM FN
	I N T E R P O L A C I O N A R I A	INTERPOLAÇÃO LINEAR	L ou C
C F O E M R P R R d e A I M M E N T I A O	E S P E C I A L	INTERPOLAÇÃO CIRCULAR	L C e C ou C e L
	NÃO SE APLICA	TL	D (Nº REFERENTE À POSIÇÃO DA FERRAMENTA NO MAGAZINE)

Figura 5.4 – Tabela de identificação de EG's para os programas de medição e usinagem

Desta forma, quando se realiza a inspeção dimensional da peça fazendo-se a medição dos EG's especificados, os quais estão codificados/identificados de forma compatível, consegue-se ter o relacionamento entre estes dois processos, inspeção e fabricação. A

Partir do protocolo de medição, monta-se a matriz de erros geométricos (análise de tolerância), que contém os elementos geométricos que apresentam erros, cujo o valor do campo excede seja maior ou igual à 75% (fig. 5.5). A matriz de erros geométricos utilizada na AMI não necessita ser arquivada, estando apenas disponível durante a execução do sistema.

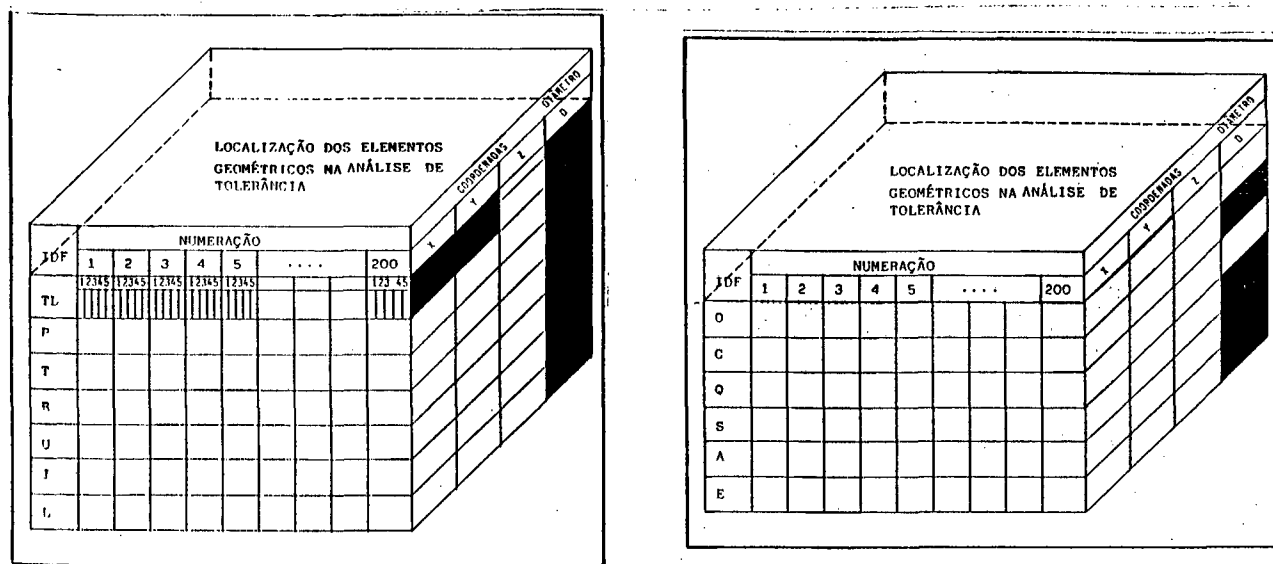


Figura 5.5 - Matriz de erros geométricos

5.2 IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS NA AMII E AT ASSOCIADA

O nível de complexidade de identificação/codificação dos EG's na AMII é muito menor quando comparado com a AMI. Como na AMI, divide-se a identificação em dois grupos: identificadores para o processo de furação/correlatos e para o processo de fresamento. Nestes, os identificadores associam o número da ferramenta, descrito pela posição que ela ocupa no magazine de ferramenta ("D__"), ao elemento ou elementos geométricos que a representa no protocolo de medição. As correções ocorrem sobre os dados de ferramenta (diâmetro da ferramenta), que estão definidos no arquivo de dados de ferramenta em uma área de memória específica disponível no CNC. A identificação/codificação no protocolo de medição é realizada da seguinte maneira, por ex. D209:

9 n^o do EG (0 a 9)

20 nº da ferramenta

D tipo de identificador: D - para furação/correlata
M - para fresamento

A figura 5.6 apresenta o relacionamento entre o protocolo de medição e os dados de ferramenta, realizado através desta identificação.

CARACTERÍSTICAS	IDENTIFICADORES	
	PROTOCOLO DE MEDIÇÃO	ARQUIVO DADOS DE FERRAMENTA
FURAÇÃO	D	D
FRESAMENTO	M	D

Figura 5.6 - Tabela de identificadores de EG's utilizados na AMII

Para possibilitar a análise do resultado de medição através de técnicas de pré-controle é necessário ter a disposição os dados referentes as medições passadas, portanto o seu armazenamento pelo sistema de realimentação é essencial.

5.3 ESTRUTURA DA PROGRAMAÇÃO NC PARA O PROCESSO DE MEDIÇÃO

A programação "NC" de medição, nesta implementação, é realizada pelo método de aprendizado ("teaching") onde, baseando-se no procedimento de medição de uma primeira peça, o controlador da CMM (CMMC = CNC especial + computador) armazena todos os pontos (intermediários e de apalpação) e funções de medição (de círculo, intersecção linha-linha/círculo, linha, ponto, etc), compondo um programa de medição, de tal forma que o mesmo possa ser repetido quantas vezes se queira, fazendo uma medição totalmente automática. O programa "NC", gerado pelo método de programação por aprendizagem, é estruturado em um formato particular (que varia de fabricante para fabricante de CMM) sendo designado por "dados de controle", já existindo propostas de padronização destes. Durante o processo de programação ou no seu final, faz-se a organização (fig. 3.13) do protocolo de medição, fornecendo informações referentes a:

- nome da peça e data;
- identificação dos elementos geométricos de interesse;
- dados nominais;

- dados de tolerância;
 - . afastamento superior
 - . afastamento inferior

Na medição por coordenadas a geometria da peça é definida por pontos em um sistema de coordenadas especial. A fim de viabilizar a metodologia é essencial que este sistema de coordenadas seja o mesmo que o estabelecido para a fabricação. O ponto onde é definido o zero peça de usinagem deve ser integro, devendo as superfícies que o delimitam possuírem erros dimensionais insignificantes em relação aos outros erros presentes nos demais EG's que formam a peça. Isto, para que sua influência seja a mínima possível, podendo-se assim, garantir a compatibilidade de coordenadas (elementos geométricos).

O que interessa como dado de medição, neste caso, são as coordenadas dos vértices, das intersecções, das concordâncias (linha/linha, linha/circunferência) e dos pontos (que definem o centro dos furos) além, é claro, do diâmetro das circunferências. Isso é necessário pois o programa de usinagem NC utiliza-se destes valores (coordenadas) na definição de movimentação de ferramenta.

5.4 ESTRUTURA DA PROGRAMAÇÃO NC PARA O PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Para que o sistema ReQual possa fazer as correções a partir das estratégias disponíveis na AMI e AMII, é necessário respeitar algumas regras durante o processo de programação NC da peça. Além disso, nem todos os recursos de programação disponíveis em APT/EXAPT poderão ser utilizados. Dentre os recursos de programação disponíveis, que podem ser tratados/interpretados pelo sistema, estão:

- Transformações;
 - . "Index"/"Copy" (APT/EXAPT)
 - . "Tracut"/"Matrix" (APT)
 - . "Matrix"/"Transl" (EXAPT)
- Macros criadas pelo programador;
- Sub-rotinas de furação já definidas no CNC (L81 - L89);
- Ciclos de furação (G80 - G89) associado ou não a "patern" de

furação:

"Patern" circular

"Patern" linear

- Qualquer declaração básica de geometria e de movimentação de ferramenta.

Estes recursos aceitos pelo sistema ReQual são suficientes para se ter um sistema de programação bastante flexível e com relativo poder de programação, pois estes são os recursos, normalmente, mais empregados pelos programadores.

A figura 5.7 apresenta uma peça com a identificação de todos os EG's necessários para possibilitar a associação do processo de medição, para peças em início de produção, com o programa NC (AMI); e do processo de medição para peça em ciclo de produção com a ferramenta utilizada (AMII).

Todos os valores de coordenadas dos EG's podem ser calculados através dos recursos/funções disponíveis nos softwares de medição oferecidos pelos fabricantes de CMM /91/.

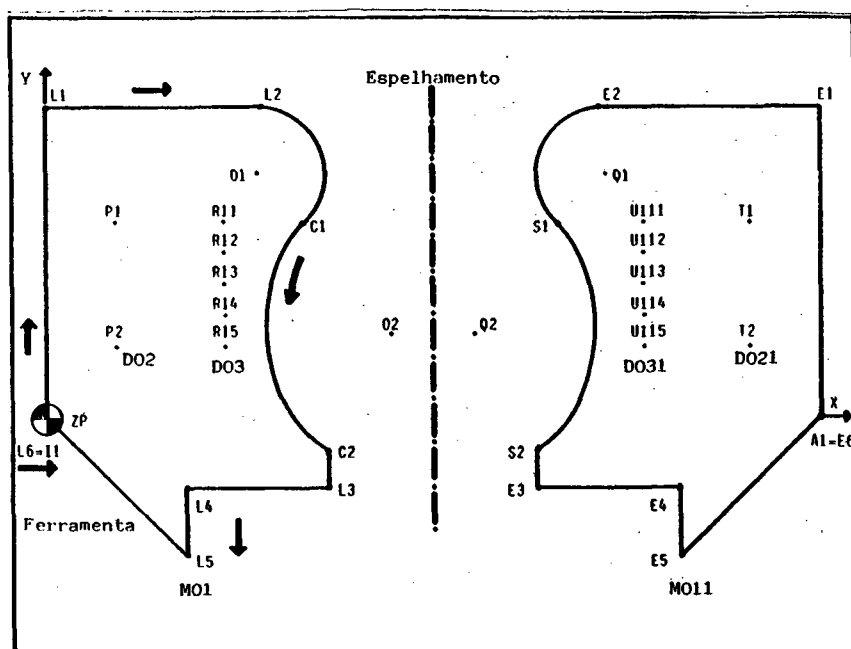


Figura 5.7 - Identificação de uma peça exemplo para AMI e AMII

Como regra de programação NC, segue-se uma estrutura hierárquica (fig. 5.8) onde uma transformação pode conter macros, que por sua

vez conterá declarações básicas, não sendo permitido o inverso. As definições de "Macro", podem ser efetuadas, a qualquer momento da programação, desde que se respeite a estrutura hierárquica, não podendo ter uma transformação dentro de uma "Macro".

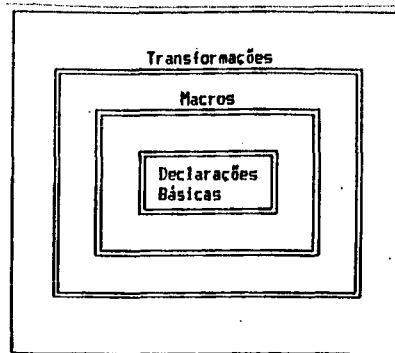


Figura 5.8 - Estrutura hierárquica para declarações de programação tipo APT

Quando se faz a programação de uma transformação, antes do início da marcação dos blocos que sofrerão transformação, e depois de desativada a marcação, utiliza-se dos seguintes comentários através da função "PPrint": M/FM (início e fim de fresamento) e T/FT (início e fim de furação), para possibilitar a sua identificação no programa NC (fig. 5.9).

110 PPRINT/***** FIXACAO DA PECA *****	140 \$\$ *****
111 \$\$	141 \$\$
112 \$\$\$\$\$\$ PROGRAMA PRINCIPAL *****	142 CALL/TROCA,A=0004,B=04,C=04,S=800
113 PPFUN/PALLET,1	143 INDEX/2
114 CALL/TROCA,A=0001,B=1,C=3,S=500	144 CALL/FRES,N1=4,N2=5,IP=P7
115 COOLNT/ON,LUBRIF	145 GOTO/P7
116 INDEX/1	146 G0DLTA/-25
117 CALL/FURO,PONTO=P1,DTAN=10	147 CALL/FRES,N1=4,N2=6,IP=P7
118 CALL/FURO,PONTO=P2,DTAN=10	148 GOTO/P7
119 PPRINT/R1	149 G0DLTA/-25
120 CYCLE/81,PLREF,0,PROFUN,-20	150 CALL/FRES,N1=4,N2=4,IP=P7
121 GOTO/R1	151 G0DLTA/25
122 CYCLE/ OFF	152 INDEX/2,NOMORE
123 CALL/TROCA,A=0002,B=2,C=3,S=500	153 \$\$
124 CALL/FURO,PONTO=P1,DTAN=30	154 CALL/INFR,DIR=LEFT,T00=04,IFF=P7
125 CALL/FURO,PONTO=P2,DTAN=10	155 COPY/2,SAME,1
126 PPRINT/R1	156 PPRINT/M1 ***** INICIO ESPELHAMENTO FRESAMENTO
127 CYCLE/81,PLREF,0,PROFUN,-20	157 CALL/INFR,DIR=RIGHT,T00=04,IFF=P9
128 GOTO/R1	158 COPY/2,MIRROR,LESP,1
129 CYCLE/ OFF	159 \$\$
130 INDEX/1,NOMORE	160 PPRINT/FM1 ***** FIN DE ESPELHAMENTO FRESAMENTO
131 \$\$	161 \$\$
132 FROM/200,100	162 PPRINT/ ***** TERMINO DE USINAGEM *****
133 \$\$	163 \$\$
134 COPY/1,SAME,1	164 G0DLTA/80
135 \$\$	165 SPINDL/OFF
136 PPRINT/T1 ***** ESPELHAMENTO FURACAO *****	166 PPFUN/PALLET,OFF
137 COPY/1,MIRROR,LESP,1	167 CLPRNT
138 PPRINT/FT1 ***** FIN ESPELHAMENTO FURACAO *****	168 PRINT/3,ALL
139 \$\$	169 FINI

Figura 5.9 - Introdução de comentários de transformação

Também, é necessário a introdução de comentário para identificar o início de uma declaração de "patern", a qual pertence a classe de declarações básicas. As macros não necessitam de comentários especiais para auxiliarem na sua localização pelo sistema ReQual, como as transformações e os "paterns". Estes requisitos, citados acima, satisfazem as necessidades da AMI, contudo necessitam serem acrescidos de mais algumas regras para satisfazerem a AMII.

5.4.1 Complementação das Estratégias de Programação Para a AMII

O pós-processador de um sistema tipo APT deve gerar o programa NC com funções de compensação de raio de fresa /80/, não devendo gerar os pontos da trajetória como se o gume de corte fosse o centro da ferramenta, já levando em conta nos cálculos o raio de ferramenta. Esta compensação deve ser feita pelo CNC quando da execução do programa na máquina-ferramenta possibilitando, assim, a correção de dados de ferramenta pela AMII.

Deve-se, também, deixar a compensação de comprimento de ferramenta a cargo do CNC e não já ser levado em conta no cálculo da trajetória de ferramenta realizado pelo processador ou a nível de pós-processador. Desta forma, tem-se maior flexibilidade e facilidade de correções por meio de dados de ferramenta (comprimento e raio), o que não ocorre se as coordenadas X, Y e Z da movimentação de ferramenta já estiverem levando em consideração este dado. Por outro lado, se estes requisitos não forem atendidos não será possível a utilização desta estratégia de correção.

Quando determinada operação de usinagem deve ser executada com diversos passes (fresamento), deve-se utilizar como estratégia de programação, a definição de raio fictício de ferramenta por meio de declarações "Cutcom"/"Ofstno" (EXAPT) ou "Cutcom" (APT), que são funções de pós-processador, que introduzem na sequência do programa NC um bloco com dados fictícios de ferramenta ("D__"), sendo este levado em consideração pelo CNC em conjunto com a função compensação de raio de fresa (G40, G41, G42), sendo válido apenas para o fresamento /80/.

Desta forma, pode-se utilizá-lo em conjunto com macros, iniciando com uma definição de diâmetro fictício maior que o diâmetro real da ferramenta, deixando uma sobre-medida (ferramenta apresenta um diâmetro real menor que o definido) e ir diminuindo esta definição até se chegar ao diâmetro real da ferramenta, determinando assim a quantidade de passes/macros de usinagem (fig. 5.10).

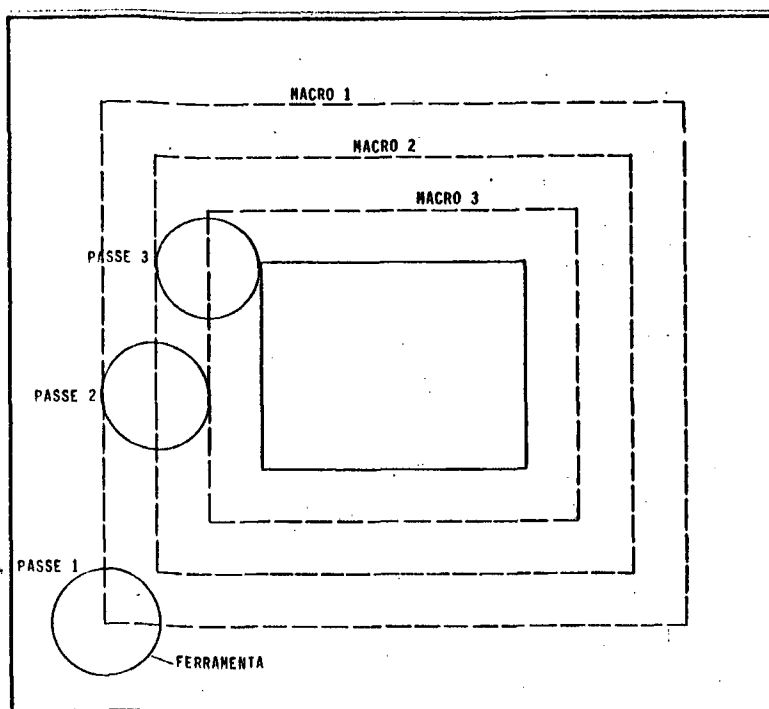


Figura 5.10 - Uso de definição fictícia de raio de ferramenta

Um fator de extrema importância, também para a AMI, é a programação em coordenada absoluta, onde todas as dimensões/coordenadas se referem a um ponto de origem fixo da peça (zero peça), possibilitando a total compatibilidade com o processo de medição. Caso contrário, é necessário trabalhar com duas cotagens distintas para a representação da peça no planejamento dos processos de inspeção e fabricação, pois a CMM fornece os dados de medição em coordenada absoluta, referenciada a um determinado ponto zero na peça (zero peça de medição). Caso não se adote essa total compatibilidade, aumenta-se a probabilidade de falhas humanas no processo de planejamento, pois os programas de usinagem e medição não estariam totalmente amarrados, deixando brechas para erros de interpretação e associação de elementos geométricos.

Não se deve utilizar declarações de linguagem de alto nível tipo "Origin" ou "Trans" (APT/EXAPT), para definição do zero peça em relação ao zero máquina (ponto de referência dos eixos coordenados da MfU). Se isso for efetuado, toda a movimentação de ferramenta será transladada dos valores das coordenadas desta definição, de acordo com o tratamento dado pelo pós-processador para estas funções, incompatibilizando o relacionamento inspeção/fabricação. Para evitar esta possibilidade, deve-se trabalhar com a definição de zero peça no comando NC, através das funções de "seleção do deslocamento de origem" aceitas pelo CNC, no caso (G54, G55, G56, G57) /80/.

5.5 RELACIONAMENTO ENTRE O PROGRAMA DE USINAGEM E O DE MEDIÇÃO

O relacionamento começa no planejamento conjunto da inspeção e fabricação, a partir da definição de um mesmo zero peça para os programas de usinagem e medição. Adota-se todas as recomendações/regras para a programação dos processos de usinagem e medição, bem como, da identificação dos EG's de interesse para a inspeção na AMI e AMII, como descrito nos tópicos anteriores. A seguir faz-se uma análise do procedimento de escolha de zero peça, válido para a AMI e AMII, e uma descrição do relacionamento entre o programa de usinagem e medição para AMI e AMII.

5.5.1 Escolha do Zero Peça

A definição de zero peça (ZP) para a usinagem (ZPU) e medição (ZPM) é extremamente crítica, influenciando negativamente na análise de correção de erros, caso os ZP's (ZPU = ZPM) não sejam bem especificados no planejamento.

Deve-se tomar um cuidado especial para selecionar a entidade de referência na peça a ser usinada/verificada, pois é em relação a esta entidade que será referenciado o ZP. O requisito principal para se garantir a integridade da entidade de referência, é que a mesma esteja isenta da parcela de erros sistemáticos de fabricação, caso contrário, será muito difícil a análise e identificação da

causa de erro que está fazendo com que as dimensões de um EG não estejam no campo de tolerância permissível. O problema agora torna-se mais complexo pois, tem-se, também, que separar a parcela de erro devido à transferência do erro sistemático da entidade de referência para o EG analisado, do erro total apresentado pelo mesmo, conseguindo-se desta forma quantificar somente o erro presente no EG em questão.

Não existe uma regra, propriamente dita, para seleção da entidade geométrica onde será definido o ZP. O que se pode fazer é oferecer orientações e condições para a escolha desta entidade, pois cada peça dependendo de sua geometria, ou seja, dos EG's que a constituem e do tipo de verificação geométrica requerida, é que determinará, neste caso, qual a melhor solução a ser adotada, sendo esta análise realizada no planejamento de processos. A seguir, são apresentadas algumas diretrizes e condições para a seleção da entidade de referência, quando apenas requisitos dimensionais e de posição serão inspecionados:

- O centro de um furo, de qualidade melhor ou igual a H9, adequadamente escolhido. Normalmente, erros de forma (circularidade) são da ordem de centésimos de milímetro /92/, não influenciando significamente a dimensão final do elemento. Degaste de ferramenta e efeitos similares, também não influenciam significamente na localização do centro do furo, desde que haja um desgaste homogêneo dos gumes de corte da ferramenta, o que, normalmente, ocorre se a afiação é homogênea.
- Um vértice, desde que as superfícies que o delimitam, sejam de boa qualidade. Isto, para que se garanta que os erros dimensionais que ocorrem possam ser considerados insignificantes quando comparados aos demais erros proporcionados pelas outras ferramentas, ou seja, deve-se garantir a integridade do gume de corte da ferramenta de acabamento que irá usinar as superfícies que definem o zero peça/vértice.

Deve-se salientar que as superfícies/entidades que fornecem o ponto de referência podem apresentar um pequeno erro de forma (macrogeometria) de até 1/10 a 1/5 da tolerância apresentada pelos EG's.

A figura 5.11, mostra um exemplo da importância da escolha de superfícies de referência. As linhas tracejadas representam o contorno real da peça e a linha cheia o nominal. Como não se tem nenhuma superfície "isenta" de erros, os dados referentes aos erros dos EG's estarão superpostos ao zero peça, induzindo a falsas ações corretivas. Entretanto, se, por exemplo, o furo for íntegro, ele poderá ser utilizado como zero peça, minimizando este efeito.

Também é necessário orientar as pessoas ligadas ao projeto no sentido de procurarem cotar os desenhos a partir das superfícies de referência. Assim o fazendo na definição do zero peça de projeto, as etapas de planejamento da inspeção e fabricação estariam sujeitas a uma menor possibilidade de erros grosseiros por parte das pessoas ligadas ao planejamento e programação destes processos.

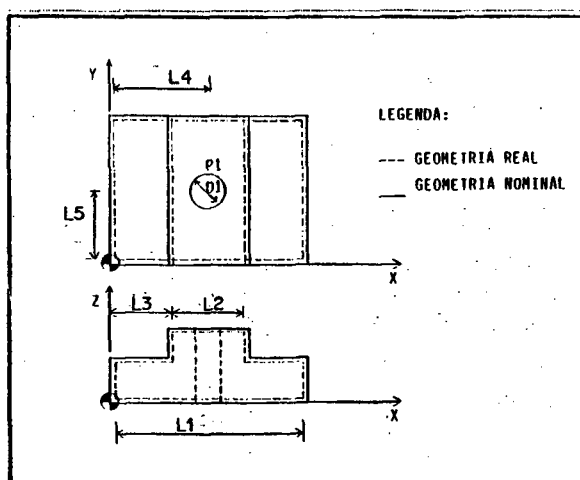


Figura 5.11 - Escolha de zero peça - superfície de referência

5.5.2 Relacionamento Dos Processos Na Fase AMI

Todo o relacionamento dá-se através da identificação dos EG's e dos comentários inseridos no programa NC. A partir da identificação de um EG com erro, este é pesquisado no programa NC de acordo com a sua codificação, verificando, inicialmente, se o mesmo pertence a uma declaração básica. Quando este EG é achado, no caso de declaração básica, faz-se a correção e continua-se a pesquisa no restante do programa NC para verificar se ele aparece novamente, ou seja, se é devido a uma programação normal (avanço rápido,

interpolação linear ou circular), a uma sub-rotina ou a uma "macro" definida várias vezes (pesquisa de declaração normal, de "macro" ou de sub-rotina). O mesmo procedimento é válido no caso de transformações, desde que se respeite a hierarquia de declarações. A figura 5.12, apresenta este relacionamento para as operações de fresamento e furação/correlatas. Estas observações são válidas no caso de correções localizadas. Caso os erros dos EG em determinada coordenada (X,Y ou Z) sejam da mesma ordem de grandeza e com a mesma direção de propagação, a alteração é realizada sobre a definição de zero peça. Esta análise é a primeira a ser efetuada, comparando os erros de todos os EG's e para todas as coordenadas. O elemento geométrico "TL", associado a comprimento de ferramenta, não é analisado quando se faz a correção de coordenada "Z" através de zero peça.

CARACTERÍSTICAS PROCESSO	CLASSE DE DECLARAÇÃO	IDENTIFICADORES		RELACIONAMENTO
		PN	PROGRAMA NC C/COMENTÁRIOS	
F U R A Ç Ã O	BÁSICA	PONTO (SUB-ROTINA)	P	PROGRAMAÇÃO NORMAL, COM MACRO e/ou SUB ROTINA, VARREDURA
		PATERN (CICLO FIXO)	R	COMENTÁRIO R INTRODUZIDO PELO PROGRAMADOR
	ESPECIAL	PONTO (SUB-ROTINA)	T	INÍCIO COM T e FINALI- ZA COM FT
		PATERN (CICLO FIXO)	U	COMENTÁRIO U INTRODUZIDO PELO PROGRAMADOR
F R E S A M E N T O	BÁSICA	INÍCIO DE FRESAMENTO	I	L ou C
		INTERPOLAÇÃO LINEAR	L	
		INTERPOLAÇÃO CIRCULAR	C	C e C ou C e L
			O	
	ESPECIAL	INÍCIO DE FRESAMENTO	A	INÍCIO COM N e FINALI- ZA COM FN
		INTERPOLAÇÃO LINEAR	E	L ou C
		INTERPOLAÇÃO CIRCULAR	S	L
			Q	C e C ou C e L

Figura 5.12 - Relacionamento entre o programa NC e o protocolo de medição

Estes indentificadores são codificados no protocolo de medição, de acordo com o caso: com uma letra (exceto "TL" com duas) mais uma numeração, que indica o número do elemento geométrico de determinada classe (declarações básicas); com mais uma segunda numeração, que indica o número da transformação (declarações especiais) e/ou de "patern"; e mais um o último dígito indicando

qual o tipo de coordenada que apresenta erro. São representados, assim, por até 5 dígitos, como já descrito anteriormente.

De acordo com esta codificação, um determinado EG é pesquisado no programa NC (no caso de não se tratar de correções através de zero peça e/ou comprimento de ferramenta) em um campo pré-definido. O sistema ReQual é configurado, inicialmente, para fazer esta pesquisa a partir da coluna 67 até a 71. Contudo, pode-se configurar o início desta pesquisa em qualquer coluna, dependendo de onde este campo está definido no programa NC, não sendo necessário, assim, impor esta condição como pré-requisito de configuração do sistema.

Depois de achado o elemento geométrico desejado no campo de identificação do programa NC, parte-se, de acordo com o tipo de coordenada (X, Y, Z e/ou D) e do tipo de EG, para uma análise a fim de decidir onde e qual coordenada ou parâmetro deve ser modificado no programa NC. Esta análise leva em consideração aspectos de movimentação de ferramenta e de processo de fabricação, atacando o problema, como faria um especialista da área, através de regras de produção ("IF/Then") e heurísticas em suas decisões /93/.

5.5.3 Relacionamento Dos Processos Na Fase AMII

Fazendo-se o relacionamento de uma ou mais dimensões/coordenadas características da peça à uma ferramenta específica e utilizando técnicas de controle estatístico de processo, acompanha-se a evolução/história do processo e faz-se as realimentações necessárias, alterando dados de ferramenta, interrompendo o processo e indicando troca de ferramenta.

Para avaliar os erros presentes, principalmente desgaste de ferramenta e efeitos similares, não é conveniente utilizar como dado de análise, a distância entre dois elementos geométricos quaisquer usinados com a mesma ferramenta, pois poderá haver uma composição de erros devido ao erro do 1º EG e ao erro do 2º EG, que estariam sendo superpostos, apresentando um "off-set" maior, caso um dos EG's não estivesse relacionado a uma superfície de

referência (fig. 5.13). Para evitar/minimizar este problema, a dimensão deve ser associada ao zero peça.

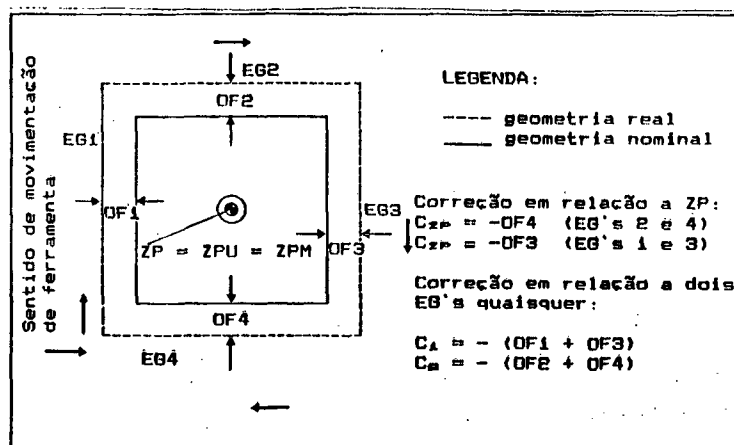


Figura 5.13 - Evolução de composição de erros para a AMII

O valor da dimensão que caracteriza a ferramenta pode ser baseado em uma única coordenada de um EG característico, ou na média de um determinado número de coordenadas de EG's característicos distintos (no caso até 10). A utilização de um valor médio é mais adequado, por caracterizar uma determinada ferramenta de maneira mais confiável, estando menos sujeita a fatores aleatórios que poderiam "mascarar" o resultado.

5.6 ESTRATÉGIAS E AÇÕES CORRETIVAS NA FASE AMI

Inicialmente, o sistema ReQual lê todos os dados do protocolo de medição e armazena os elementos que apresentam erros maiores ou iguais à 75% do campo excede (cap. 3). Estes erros são organizados na matriz de erros geométricos de acordo com o tipo de coordenada do EG (X,Y,Z), e no caso de circunferência, coordenadas (X,Y,Z) e diâmetro (D).

O Processador de Correções I (fig. 6.1), associado à AMI, tem sua atuação dividida em 12 etapas para análise e correção de erros, de acordo com o tipo de processo de fabricação e declaração utilizada.

A primeira etapa a ser testada envolve a análise de todos os EG/identificadores, exceto "TL", sendo responsável pela correção de

zero peça (erro global). Quando ativada a primeira etapa, para dada coordenada, as demais etapas não realizam a análise para esta coordenada corrigida.

A segunda etapa trata de erros referentes a ajuste de comprimento de ferramenta tendo um identificador próprio, "TL". Da terceira a décima segunda etapa os erros são corrigidos alterando as coordenadas/parâmetros que definem, em conjunto com o código G, a movimentação de ferramenta no programa NC, começando com a coordenada X, seguido de Y e/ou Z; e, conforme o caso, para I, J e/ou K, referentes a definição de diâmetro (D) da interpolação circular.

Estas doze etapas são apresentadas na sequência, com suas respectivas ações corretivas:

- 1ª Etapa: observa erros em todos ou na maioria (75%) dos elementos geométricos para determinada coordenada (X, Y e/ou Z) que apresentam um mesmo comportamento, ou seja, erros de mesma magnitude e numa mesma direção (sempre positivos ou negativos):
ação corretiva: modificação das coordenadas de zero peça, acessando de forma automática a área de memória do CNC, onde se encontram os registradores que definem o "deslocamento de origem ajustável" (G54, G55, G56, G57), corrigindo-os.
- 2ª Etapa: caracteriza erros devido a comprimento de ferramenta. Se alguns EG's ("TL", que representam, através da coordenada Z, os planos de trabalho de uma determinada ferramenta) apresentam erros de mesma magnitude e numa mesma direção em três ou mais dimensões, ativa-se a ação corretiva:
ação corretiva: modificação de dados de ferramenta, no caso comprimento de ferramenta, transferindo de forma automática para o CNC os novos dados de ferramenta corrigidos, através da função de correção de ferramenta (G92) /80/.
- 3ª Etapa: pesquisa de declaração normal ou de sub-rotina ("T") dentro de declaração especial de transformação em operações de furação/correlatas:

- ação corretiva: modificação de coordenadas (X, Y, ou Z) e/ou do parâmetro R03 de sub-rotina.
- 4ª Etapa: pesquisa de declaração tipo "patern" ("U") dentro de declaração especial de transformação em operações de furação/correlatas:
ação corretiva: modificação de coordenadas (X, Y ou Z) e/ou de parâmetro R03 de ciclo fixo.
 - 5ª Etapa: pesquisa de declaração normal ou de sub-rotina ("P") em operações de furação/correlatas:
ação corretiva: idem 3ª Etapa.
 - 6ª Etapa: pesquisa de declaração tipo "patern" ("R") em operações de furação/correlatas:
ação corretiva: idem 4ª Etapa.
 - 7ª Etapa: pesquisa de declaração normal de posicionamento de ferramenta para início de fresamento ("A"), dentro de declaração especial de transformação (operações de fresamento):
ação corretiva: modificação de coordenadas (X, Y ou Z).
 - 8ª Etapa: pesquisa de declaração normal referente à movimentação de ferramenta, interpolação linear ("E"), dentro de declaração especial de transformação (operações de fresamento):
ação corretiva: idem 7ª Etapa.
 - 9ª Etapa: pesquisa de declaração normal de movimentação de ferramenta, interpolação circular ("S" e/ou "Q"), dentro de declaração especial de transformação (operação de fresamento):
ação corretiva: modificação de coordenadas (X, Y e/ou Z) e/ou (I, J e/ou K) referentes à definição dos pontos inicial e final da interpolação circular, respectivamente.
 - 10ª Etapa: pesquisa de declaração normal de posicionamento para início de fresamento ("I"):
ação corretiva: idem 7ª Etapa.

- 11ª Etapa: pesquisa de declaração normal referente à movimentação de ferramenta, interpolação linear ("L"):
ação corretiva: idem 7ª Etapa.
- 12ª Etapa: pesquisa de declaração normal de movimentação de ferramenta, interpolação circular ("C" e/ou "Q"):
ação corretiva: idem 9ª Etapa.

As ações corretivas a serem efetuadas poderão ser criticadas pelo operador. Para que isto ocorra, o sistema deverá oferecer condições, ao mesmo, que possibilitem a avaliação e até a modificação das ações corretivas sugeridas pelo sistema. Esta consideração, sobre a possibilidade de ajuda do operador, é válida também para a AMII.

5.7 ESTRATÉGIAS E AÇÕES CORRETIVAS NA FASE AMII

Realiza-se um acompanhamento de cada operação de usinagem ao longo do tempo por meio da associação ferramenta/dimensão, detectando e mesmo prevenindo erros sobre o processo, utilizando-se de conceitos de pré-controle para efetuar as ações corretivas.

Assume-se que o processo apresenta uma distribuição de frequência normal (fig. 5.14), considerando-se três zonas de controle, separadas, respectivamente, pelos valores críticos: $Z_c = \pm 1,5$, $2,25$ e 3 desvio padrão (σ); supondo que a tolerância (IT) seja igual a mais ou menos três σ (ideal, $>1,3$). Tais valores correspondem aos limites dos intervalos da distribuição normal dentro das quais a probabilidade é, respectivamente: 86%, 98% e 99,7%. Este sistema, quando comparado ao pré-controle (fig. 4.7), apresenta mais uma zona dentro da "área amarela" trabalhando-se, assim, com limites de disparo de correções maiores que para o pré-controle, que é de 86%, enquanto que para este sistema, é de 98%.

O significado das quatro zonas, apresentadas na figura 5.14 é apresentado abaixo:

- Zona I - denominada zona de controle, deve conter a maioria dos pontos (86%) se o processo estiver sob controle.

Zona II - denominada zona de advertência, pode conter alguns pontos (10,9%). A presença de um ponto nesta zona apresenta uma advertência quanto a possível falta de controle exigindo atenção. Se dois pontos consecutivos estiverem contidos nesta Zona, certamente, o processo estará fora de controle, pois a probabilidade desta ocorrência é de 1/324 ($1/18 \times 1/18$).

Zona III e IV - denominadas zona de ação, não deve conter praticamente qualquer ponto (cerca de 2% para zona III e de 0,2% para zona IV), quando o processo estiver sob controle; por isso, a presença de um ponto nestas zonas representa certamente falta de controle, exigindo imediata ação corretiva; e caso seja a zona IV, interromper o processo acusando refugo ou retrabalho. Na zona III a dimensão ainda está dentro da tolerância especificada.

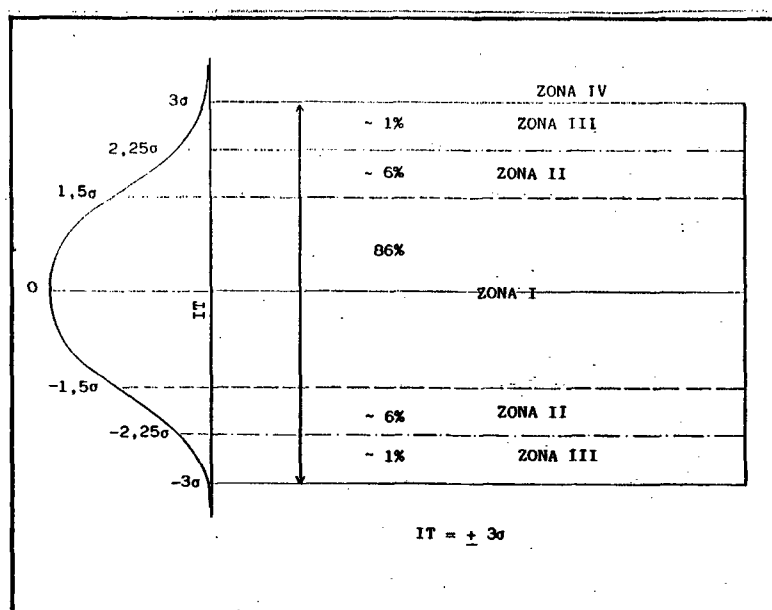


Figura 5.14 - Representação das zonas de controle

Baseando-se, assim, na análise consecutiva de duas peças, e no tempo de utilização das ferramentas, o processador de correções I adota as seguintes ações corretivas, se estas duas peças caem na Zona de Advertência (Zona II) ou na Zona de Ação (Zona III); ou se uma peça cai na Zona IV (fora das tolerâncias especificadas):

a) Furação

- alarme para interrupção do processo
- refugo/reusinagem da peça (zona IV)

- . troca de ferramenta/fim de vida (zonas III e IV)
- troca de ferramenta/fim de vida (prevenção)
- . peça boa (zonas II e III, associado ao tempo de usinagem)

b) Fresamento

- alarme para interrupção do processo
- . refugo/reusinagem da peça (zona IV)
- . troca de ferramenta/fim de vida (zona III e IV)
- compensação de raio de fresa
- . refugo/reusinagem da peça (zona IV)
- . peça boa (zona II e III)
- troca de ferramenta/fim de vida (prevenção)
- . peça boa (zonas II e III, associado ao tempo de usinagem)

Como já comentado (cap. 3), os erros devido a desgaste de ferramenta e efeitos térmicos são mais significativos em operações de desbaste que em operações de acabamento, contudo, a não correção/compensação de erros desta natureza, em operações de desbaste, acaba repercutindo em erros nas operações de acabamento. Quando se corrigir um dado real de ferramenta, deve-se também corrigir os dados fictícios, corrigindo por igual os erros devido a desgaste de ferramenta e efeitos similares, não deixando nenhuma sobre-medida entre passes de usinagem nas peças.

5.8 ÁREAS DE MEMÓRIA ACESSADAS NO CNC

A conexão/interligação microcomputador - unidade de controle da MfU, pode ser realizada de duas maneiras (fig. 5.15): CNC através da interface serial (RS232C) ou via controlador lógico programável (PLC). A primeira, permite apenas a carga e a descarga de dados NC do/para microcomputador, substituindo, simplesmente, a leitora de fitas perfurada. A segunda, via PLC, é a mais atrativa e a mais custosa de ser implementada, necessitando de uma interface especial para possibilitar a comunicação, a qual, apenas em alguns casos, é fornecida pelo fabricante. Deste modo, seria possível acessar todas as áreas de memória e endereçamento do CNC de forma transparente para o usuário, podendo, inclusive, controlar remotamente os

diversos modos de operação da unidade de controle da máquina, tornando o CNC muito mais inteligente, tais como /80/:

- escolha do modo de operação;
- partida de ciclo;
- referenciamento da MfU;
- status da máquina; entre outros.

A segunda alternativa (PLC/RS232C) é a mais atrativa. Contudo, devido à necessidade da incorporação de hardware/software especiais fornecidos por cada fabricante de CNC e da falta de interesse por parte dos fabricantes nacionais em o fornecerem comercialmente (não se tem procura que o justifique), esta opção não será analisada. Adotou-se a primeira opção, via RS232C, como solução de interligação.

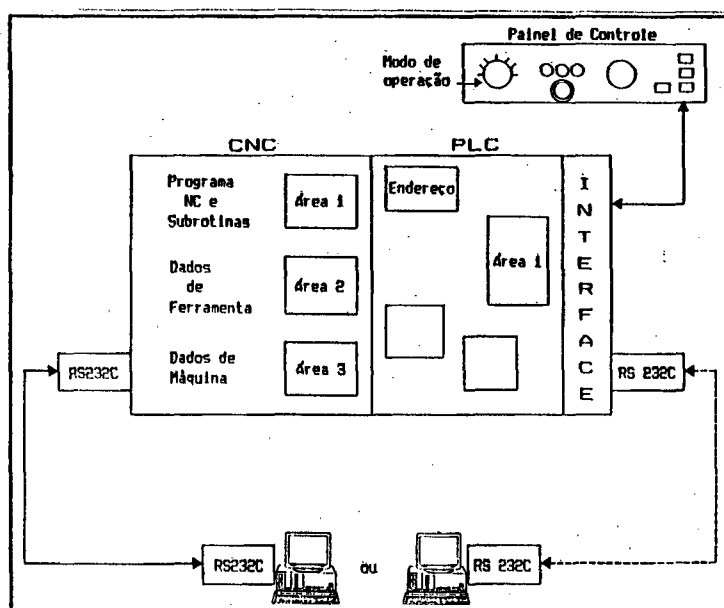


Figura 5.15 - Possibilidades de interligação CNC - microcomputador

A interligação via RS232C possibilita o acesso a algumas áreas de memória de forma direta, através da transferência de programas NC (carga e descarga), que são /65/:

- . programa principal NC ("% + 4 dígitos");
- . sub-rotinas ("L + 5 dígitos");
- . dados de ferramenta ("% T0");
- . dados de máquina ("% TE").

Além destes dados, pode-se acessar outras áreas de memória, utilizando funções especiais disponíveis no CNC, para transferir outros tipos de dados /80/:

- correção de dados de ferramenta;
- parâmetros "R_";
- "deslocamento de origem ajustável" (zero peça);
- "valores atuais";
- bits de funções especiais; entre outras.

Estes dados são transferidos dentro de um programa NC ("% + número"), utilizando-se algumas funções especiais aceitas pelo CNC ("@_"), que permitem a leitura e, em alguns casos, a introdução de novos valores (correção de ferramenta, "deslocamento de origem ajustável" e parâmetros "R_") nas áreas de memória do CNC.

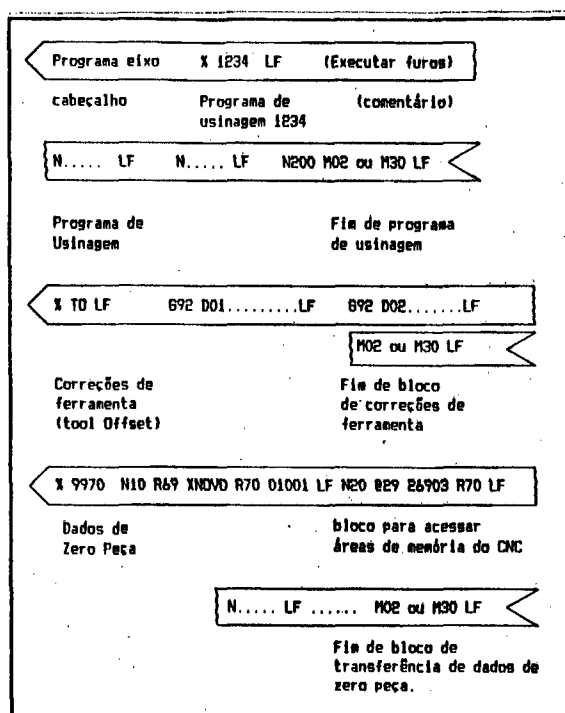


Figura 5.16 - Formato dos "programas" transferidos para o CNC

Neste trabalho, utiliza-se das seguintes formas de transferência de dados NC /80/ (fig. 5.16):

- programa principal NC: é transferido a partir da seleção deste modo de operação, no painel de controle da MfU, e de um diálogo com o CNC, no qual o operador fornece o número do programa ("% ____") e aciona a tecla "partida de ciclo";

- dados de ferramenta: é transferido da mesma forma que o programa principal NC, entretanto seleciona-se outro modo de operação do CNC, agora para correção de ferramenta ("% T0");
- dados de Zero Peça: é transferido na forma de programa NC ("%____"), sendo que o programa já apresenta uma codificação especial a fim de endereçar as áreas de memória correspondentes aos "deslocamentos de origem ajustável" (G54, G55, G56 e G57).

6. ESTRUTURA GERAL DO SISTEMA ReQual

A partir da determinação e especificação das características tecnológicas e funcionais necessárias aos três módulos básicos do sistema, apresentados no capítulo anterior, descreve-se, a seguir, a estrutura básica do software/sistema, sua especificação funcional formal através de diagramas de fluxos de dados (DFD's), o diagrama hierárquico das "Units" do sistema desenvolvido, bem como, o fluxo de telas associado.

6.1 ESTRUTURA BÁSICA E SUAS DIRETRIZES

O desenvolvimento do ReQual procurou atender as diretrizes essenciais de desenvolvimento de sistemas estruturados, apresentando uma concepção pública, bem documentado e estruturado /94/, sendo concebido de forma modular, o que permitirá à sua evolução e manutenção, futuramente.

Além destes aspectos, foram diretrizes em sua implementação, o atendimento aos seguintes requisitos:

- operação simples e confortável interação homem/máquina, sendo o sistema o mais transparente possível para o usuário;
- flexibilidade: atendendo o maior número possível de declarações de linguagens da família APT, não limitando, assim, a ação do programador NC;
- expansibilidade: devido a sua concepção modular, este requisito é plenamente satisfeito;
- confiabilidade: as correções efetuadas e transferidas para a máquina-ferramenta CNC devem ser confiáveis, garantindo-se, assim, a sua integridade.

Tendo-se, como base o que foi descrito nos capítulos 4 e 5, é apresentado na figura 6.1 a estrutura/concepção do sistema,

apresentando os seus módulos básicos (AT, AMI e AMII) e sub-módulos associados (etapas de correções, comunicação, outros).

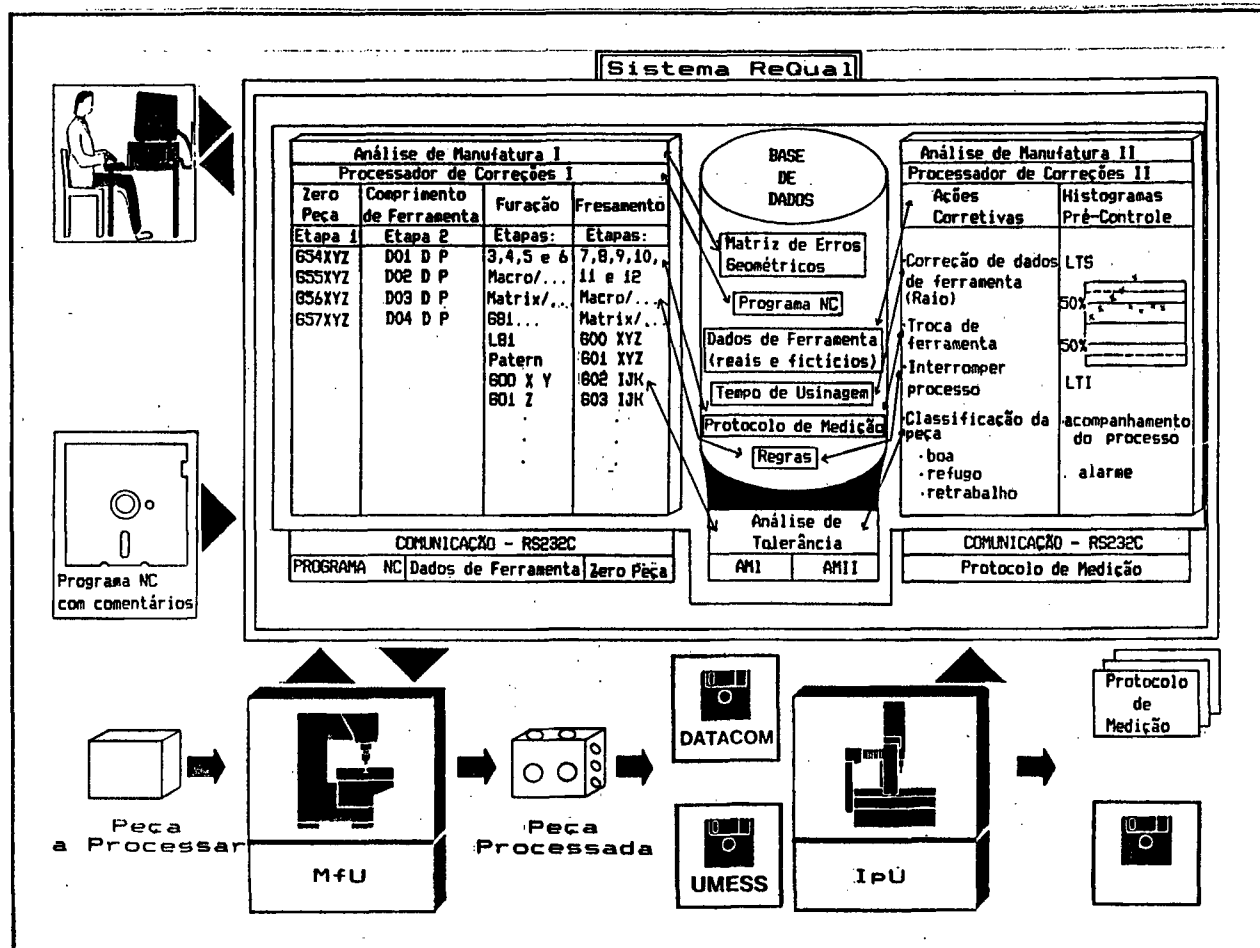


Figura 6.1 - Estrutura do sistema/software ReQual

6.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ATRAVÉS DE DIAGRAMAS DE FLUXO DE DADOS (DFD's)

O sistema ReQual foi estruturado com o uso da técnica de Análise de Sistemas Estruturados. O diagrama de bloco hierárquico dos DFD's é apresentado na figura 6.2, tendo as seguintes transformações de dados:

(DFD 1) Realimentação da Qualidade - Inspeção em Malha Fechada

(DFD 1.1) Análise de Tolerância

(1.1.1) Montar Matriz de Erros Geométricos

(DFD 1.2) Análise de Manufatura I

(1.2.1) Pesquisar EG fora ou próximo da tolerância

(1.2.2) Analisar/identificar EG fora das tolerâncias

- (1.2.3) Processador de Correções I
- (1.2.4) Filtrar programa NC com comentários
- (1.2.5) Transferir programa NC para MT CNC
- (DFD 1.3) Análise de Manufatura II
 - (1.3.1) Pesquisar EG fora ou próximo da tolerância
 - (1.3.2) Analisar/identificar EG fora das tolerâncias
 - (1.3.3) Processador de Correções II
 - (1.3.4) Transferir dados de ferramenta para MT CNC

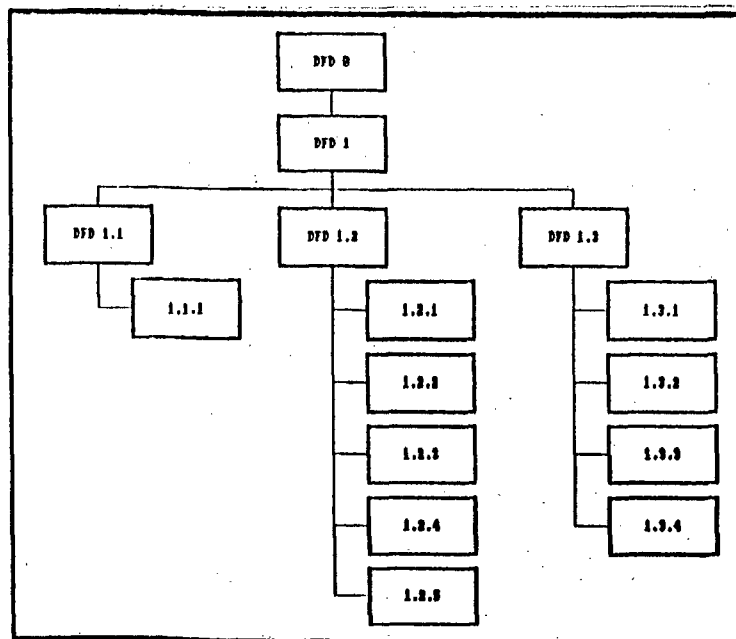


Figura 6.2 - Diagrama de bloco hierárquico dos DFD's

A figura 6.3 apresenta todos os fluxos, entradas e saídas de dados relevantes para o sistema ReQual.

A figura 6.4 detalha um pouco mais a sistema ReQual, "explodindo-o" em três módulos: Análise de Tolerância, Análise de Manufatura I e Análise de Manufatura II.

A análise de tolerância representada no DFD 1.1 (fig. 6.5), tem como função principal a montagem da matriz de erros geométricos. A partir da seleção da fase de produção, no caso peça em início de produção, transfere-se o protocolo de medição associado e extrai-se os elementos geométricos fora ou próximos da tolerância. Na versão

do sistema implementado o protocolo de medição é transferido manualmente.

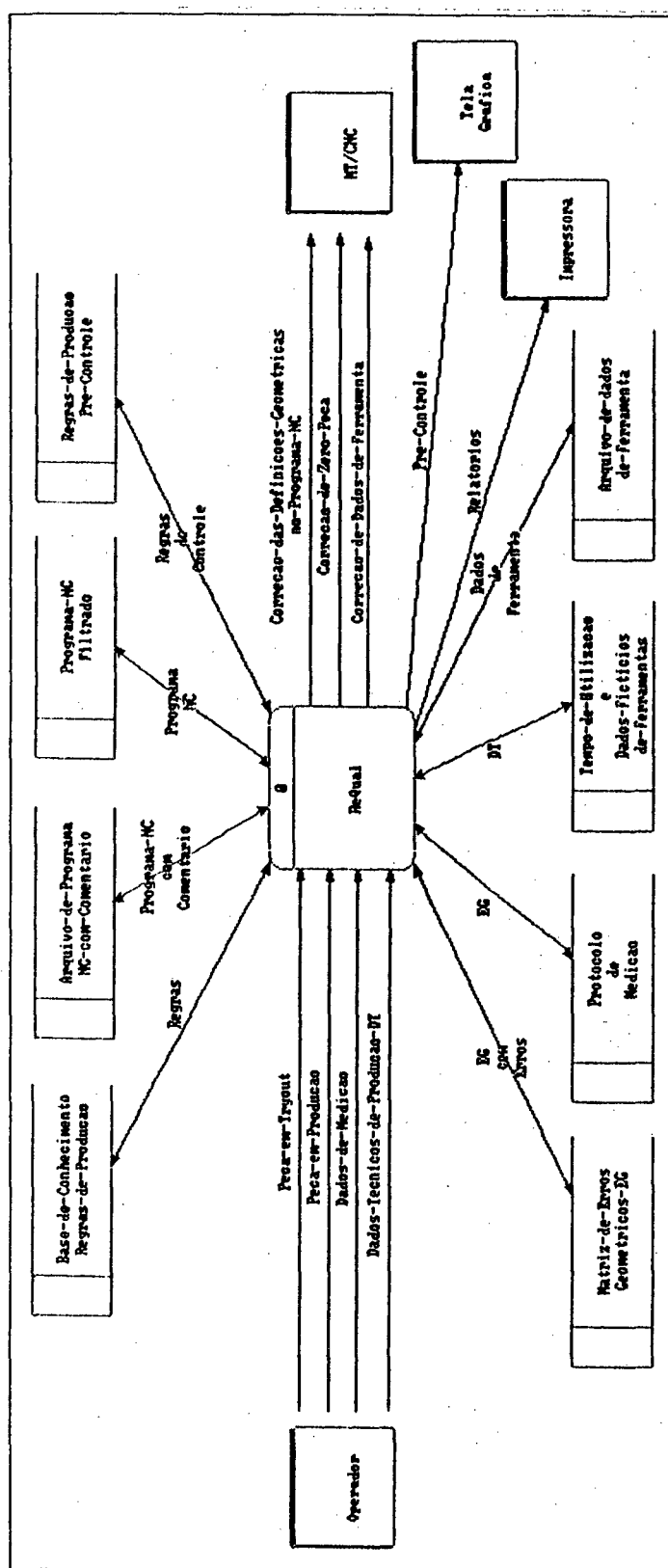


Figura 6.3 - Visão geral do sistema (DFD 0)

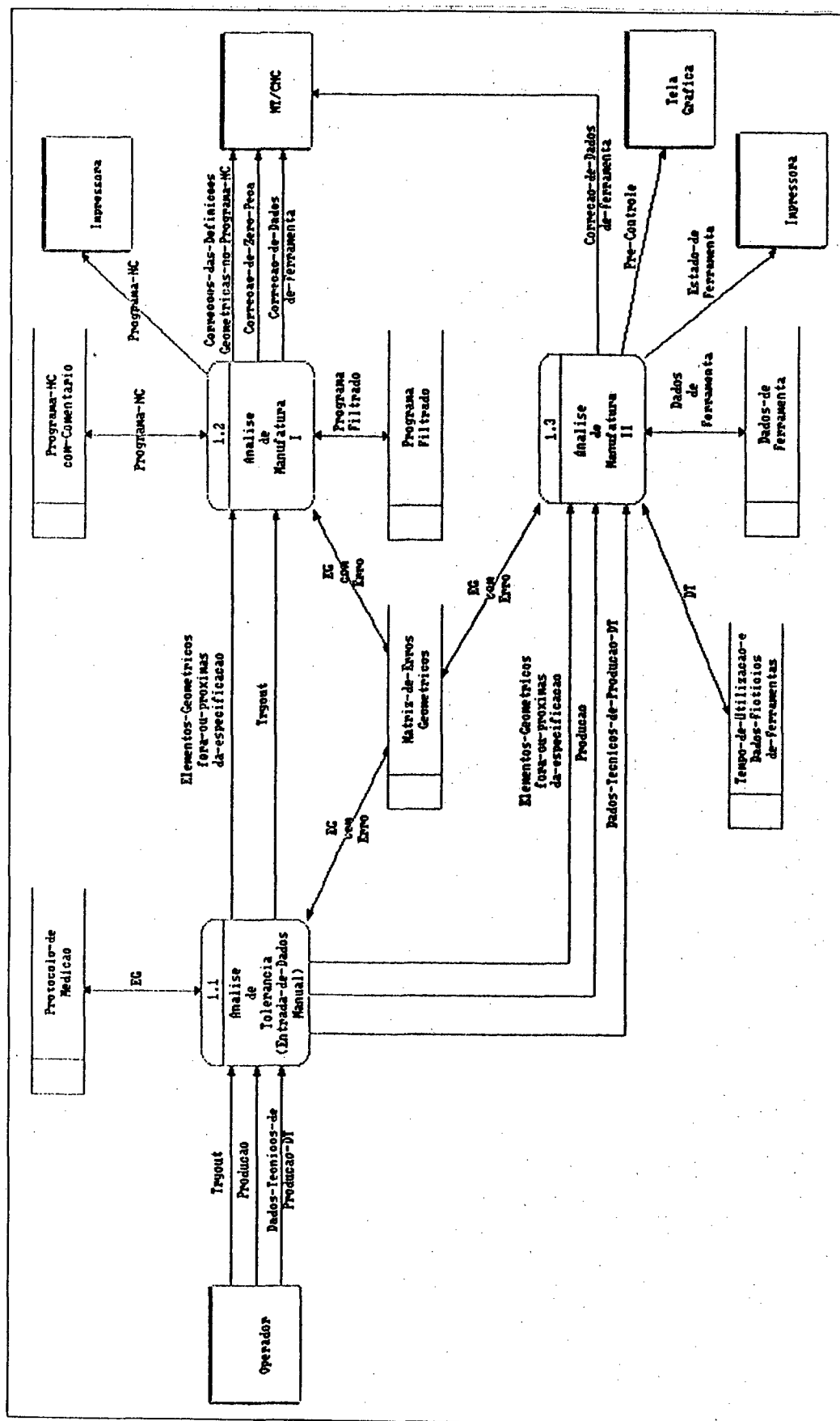


Figura 6.4 - Módulos principais do sistema ReQual (DFD 1)

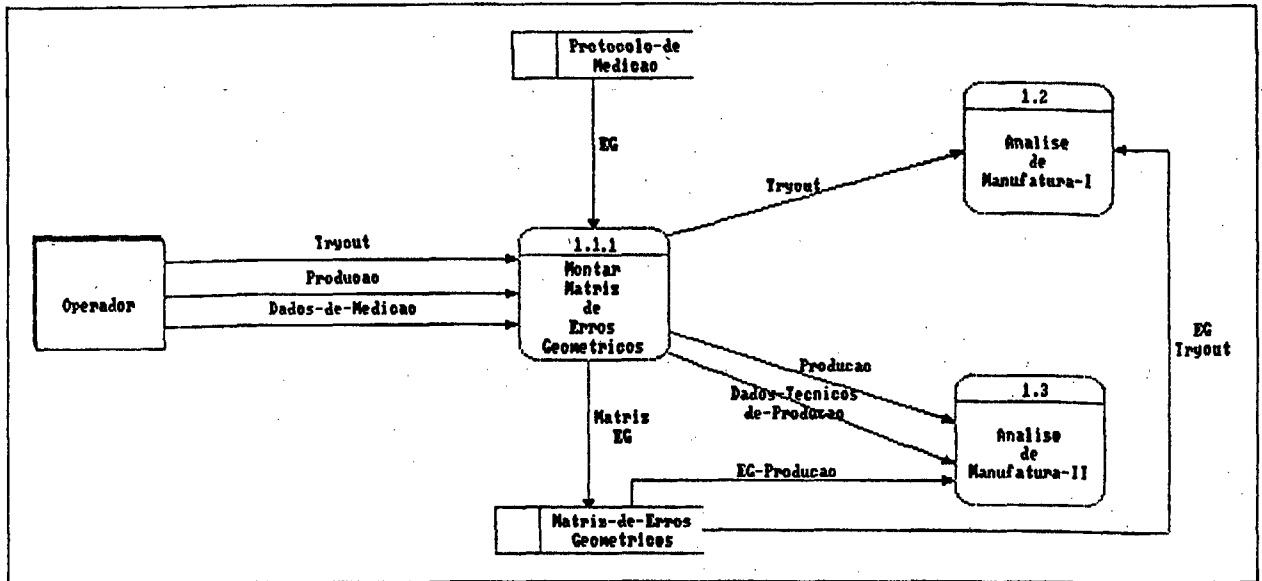


Figura 6.5 - Análise de tolerância (DFD 1.1)

NA análise de manufatura I (fig. 6.6) os elementos geométricos armazenados na matriz de erros geométricos, são pesquisados no programa NC com comentários (no caso de ações corretivas para as etapas 3 à 12), baseado em regras de produção contidas na base de conhecimento. Ao serem detectados, as linhas/blocos com estes elementos geométricos no programa NC são marcados para, em seguida, serem submetidos ao processador de correções I. A pesquisa é realizada uma única vez, a fim de agilizar o processo de marcação dos blocos com erro no programa NC. Logo, todos os identificadores (P,L,I,Q,S e demais) são pesquisados uma única vez. A filtragem do programa NC é realizada na sequência e a transferência do programa NC corrigido a seguir. O processador de correções I apresenta diversos recursos para visualização das correções efetuadas.

A figura 6.7 refere-se à análise de manufatura II. Inicia-se com a pesquisa dos EG's com erro que representam as ferramentas/operações de usinagem. Através de técnicas de pré-controle, o processador de correções II executa as análises necessárias levando em conside-

ração o histórico da dimensão do EG que representa a ferramenta, bem como, dados referentes ao tempo de utilização da ferramenta. O acompanhamento do processo é efetuado de forma gráfica indicando, de acordo com a estratégia de correção: troca de ferramenta, refugo ou retrabalho da peça, correção de dados de ferramenta e interrupção do processo.

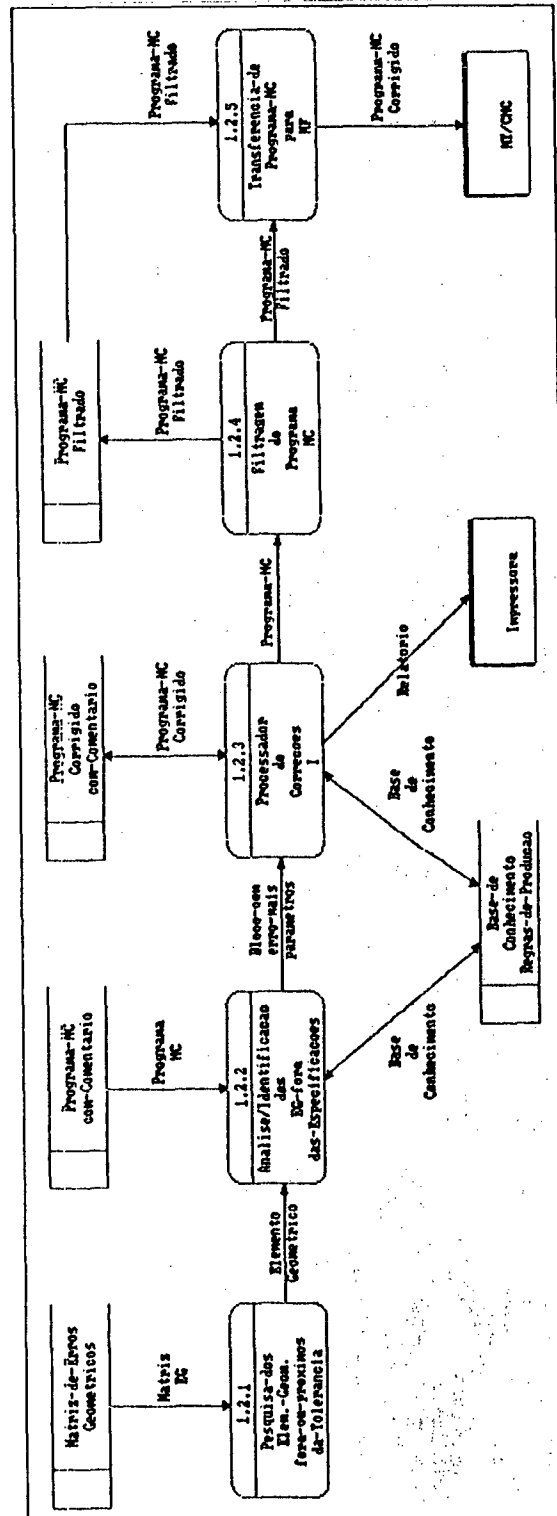


Figura 6.6 - Análise de manufatura I (DFD 1.2)

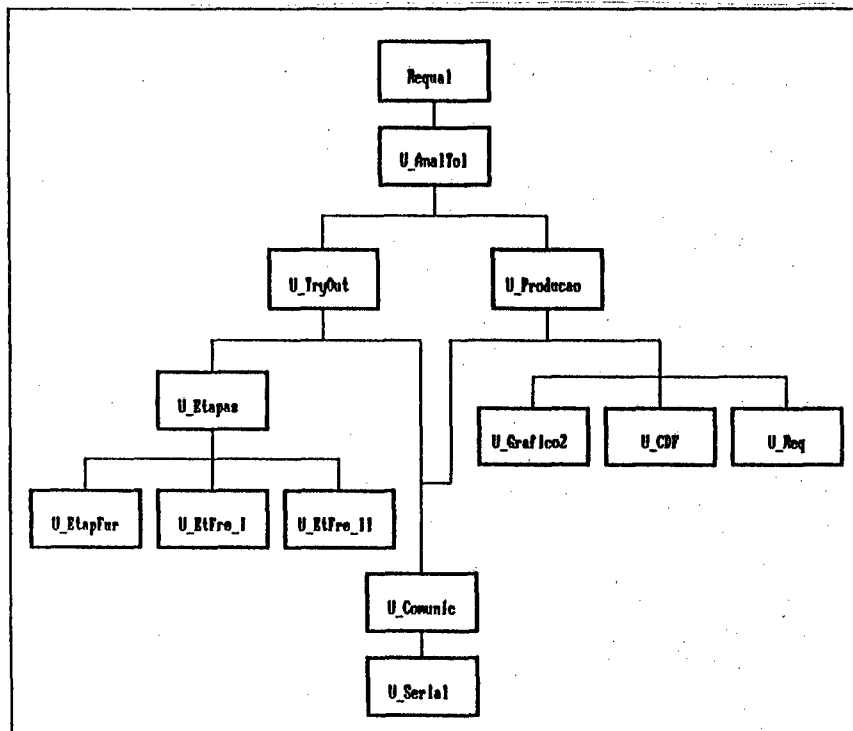


Figura 6.8 – Diagrama hierárquico das "Units"

A seguir é apresentada uma descrição das funções realizadas por estas "Units":

- U_ReQual: programa principal
- U_Analtol: tratamento das telas
 - .seleciona fase de produção (início ou ciclo de produção)
 - .preenchimento do protocolo de medição
- U_Tryout: tratamento das telas referentes à AMI
 - . U_Etapas: executa a chamada das rotinas para a correção do programa NC
 - . U_Etapfur: contêm as rotinas necessárias para a correção dos elementos geométricos de furação, referentes às etapas: 1,2,3,4,5 e 6
 - . U_Etfre_I: contêm as rotinas necessárias para a correção dos elementos geométricos de fresamento, referentes às etapas: 7,8,10 e 11
 - . U_EtfreII: idem anterior, mas referente às etapas 9 e 12
- U_Serial: contêm rotinas de tratamento da porta serial(RS-232C)

- U_Comunic: contém rotinas para efetuar a comunicação entre o CNC e o PC
- U_Produção: tratamento das telas referente à AMII
 - . U_Cdf: possui as rotinas para o cálculo de correção de desgaste de ferramenta e efeitos similares
 - . U_Req: contém rotinas complementares a U_Cdf
 - . U_Gráfico2: possui rotinas para gerar os histogramas das ferramentas

6.4 DIAGRAMA DE FLUXO DE TELAS

A figura 6.9 apresenta o diagrama de fluxo de telas, sendo o sistema ReQual composto por 23 telas, onde: o círculo representa a tela e a sigla no seu interior sua designação, as setas indicam os fluxos possíveis e a forma de acesso é apresentada através da indicação do nome da tecla sobre a seta. Caso não tenha a forma de acesso especificada, deve-se assumir que a opção é acessada através da tecla "enter", após realizada a escolha da opção através da movimentação vertical de uma área pré-definida na tela ("scroll").

As siglas adotadas para a designação das telas é apresentada a seguir :

- MP : "Menu" Principal;
- OED : Opções de Entrada de Dados;
- AT : Análise de Tolerância;
- AMI : "Menu" de Análise de Manufatura I;
- CP : Carregamento de Programa NC;
- AA : Acompanhamento da Análise;
- PCI : "Menu" do Processador de Correções I;
- MOG : Modo de Operação Global;
- MOP : Modo de Operação por Passos;
- FP : Filtragem de Programa NC;
- AMII: "Menu" Análise de Manufatura II;
- DTP : "Menu" de Dados Técnicos de Produção;
- DF : Dados de Ferramenta;
- TU : Tempo de Usinagem;

6.5 TELAS DO SISTEMA

O sistema ReQual apresenta interfaces homem/máquina (telas) de fácil preenchimento dos campos desprotegidos e com muitos recursos para facilitar o entendimento e o acompanhamento das correções efetuadas sobre o programa NC, zero peça e sobre os dados de ferramenta. A título de exemplificação, são mostradas algumas telas e dada uma rápida explanação sobre a operação do sistema.

O sistema oferece através da tela MP (fig.6.10) duas opções para análise das fases de produção da peça:

- em início de produção;
- em ciclo de produção.

De acordo com a opção escolhida, dirige-se a seguir, para a análise de tolerância, entrando com o protocolo de medição, onde faz-se a escolha por: entrada manual ou entrada automática dos dados de medição/inspeção. Nesta versão do sistema só está implementado a opção "Entrada Manual". Na figura 6.11 está representada a tela referente ao preenchimento dos dados nominais e de medição, tolerâncias, erros e excede (protocolo de medição), que possibilitará a realização da análise de tolerância e de manufatura.

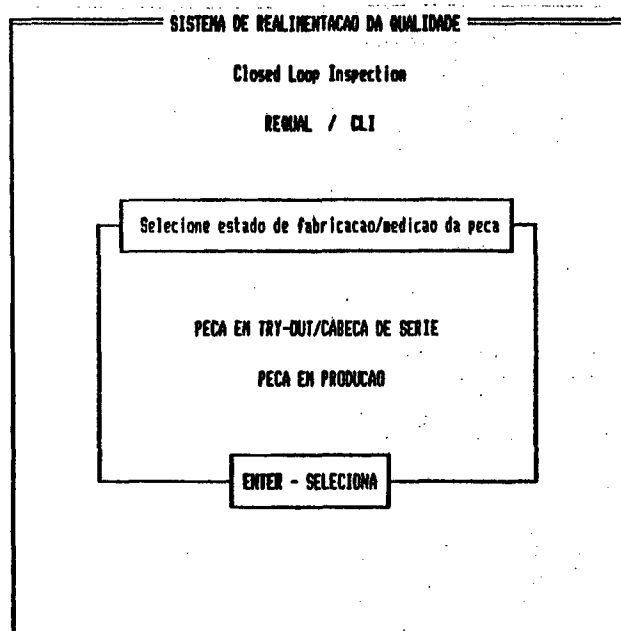


Figura 6.10 - Tela "Menu" Principal (MP)

ANALISE DE TOLERANCIA - ENTRADA MANUAL							
		Data : 4/ 4/90					
		Nome Peca : TIPICA					
		Numero Peca : 1					
		Lote : 1					
IDF	REAL	NOMINAL	LTS	LTI	ERRO	EXCEDE	
Q11X	140.00000	160.35000	0.050	-0.05	0.350	0.3	
S11X	145.00000	145.45000	0.050	-0.05	0.450	0.4	
I17	20.00000	20.15000	0.100	-0.10	0.150	0.5	
A11Z	20.00000	20.18000	0.100	-0.10	0.180	0.8	
TL41	20.00000	22.00000	0.100	-0.10	2.000	1.9	
TL42	20.00000	23.00000	0.100	-0.10	3.000	2.9	
TL43	20.00000	23.50000	0.100	-0.10	3.500	3.4	
F1 - FIM F2 - PROSSEGUE ESC - RETORNAR							

Figura 6.11 - Tela Análise de Tolerância (AT)

A tela seguinte, no caso de ter-se escolhido a opção peças em início de produção, oferece o "menu" para efetuar a AMI (fig. 6.12). A primeira opção a ser escolhida é referente ao Processador de Correções I, no qual são marcadas/efetuadas as correções sobre o programa NC com comentários, sendo estas correções mostradas na tela de Acompanhamento da Análise.

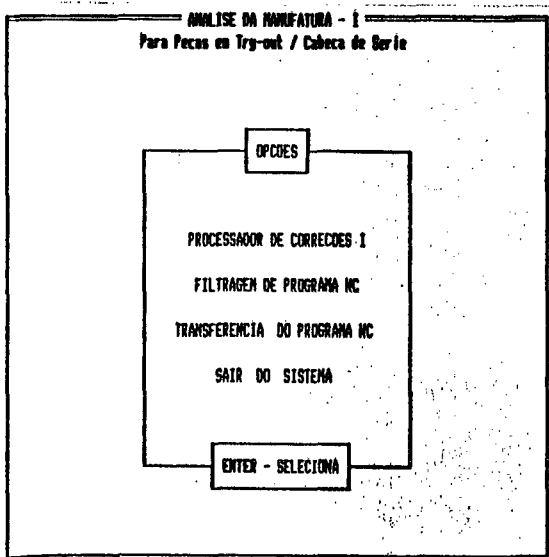


Figura 6.12 - Tela Análise de Manufatura I (AMI)

Ao final das correções o sistema apresenta a tela do "menu" do processador de correções I, que possibilita a verificação dos

blocos corrigidos, apresentando duas opções: a primeira mostra apenas o número dos blocos do programa NC corrigidos e a segunda apresenta, passo a passo, cada bloco corrigido.

Após verificar as correções, retorna-se para a tela da AMI (fig. 6.12) e seleciona-se nova opção, filtragem de programa NC, a qual apresenta a tela Filtragem de Programa NC, que realiza a filtragem do programa NC na forma de relatório, deixando-o livre dos comentários. A seguir retorna-se para a tela AMI.

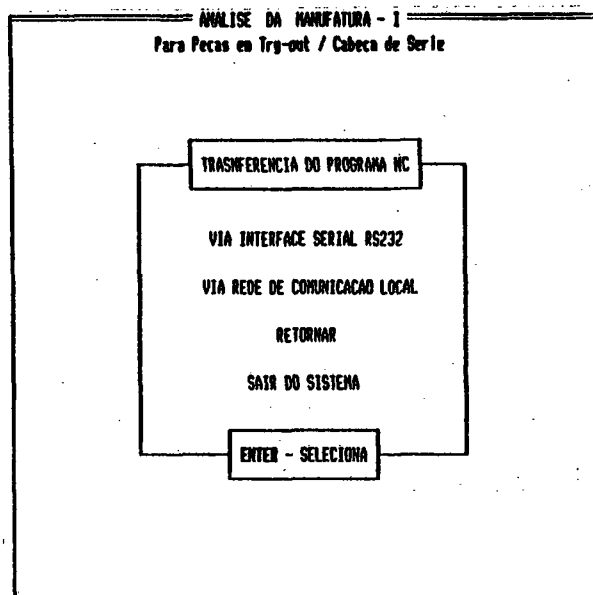


Figura 6.13 - Tela "Menu" de Transferência de Programa NC (TP)

O próximo passo é a seleção da opção transferência de programa NC, que mostrará a tela "Menu" de Transferência de Programa NC (fig. 6.13). Nesta, está implementado apenas a opção de transferência via interface serial RS232C. Ao selecioná-la, aparece a tela Opções de Comunicação e, quando inicia-se a comunicação, entra em ação a tela Status de Comunicação, que dá o diagnóstico, sucesso ou insucesso de comunicação; concluindo assim o processo de realimentação para peças em início de produção.

Caso não se tenha escolhido a opção peças em início de produção ("try-out"/novo lote)), no "menu" principal (fig. 6.10) e sim peças em ciclo de produção, vai-se após o preenchimento da AT (fig. 6.11), para a tela "Menu" Análise de Manufatura II (fig. 6.14).

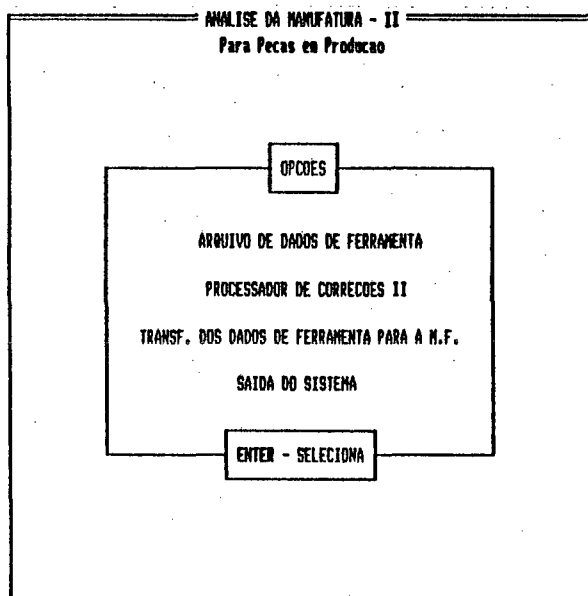


Figura 6.14 - Tela "Menu" Análise de Manufatura II (AMII)

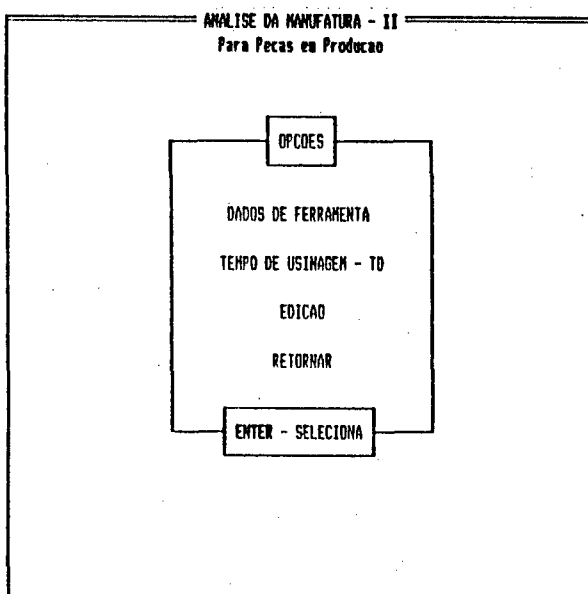


Figura 6.15 - Tela "Menu" de Dados Técnicos de Produção (DTP)

Seleciona-se, inicialmente, a opção arquivo de dados de ferramenta, aparecendo a tela "Menu" de Dados Técnicos de Produção (fig. 6.15). A primeira opção, chama a tela dados de ferramenta e, a segunda, a tela tempo de usinagem, onde são informados dados essenciais para que o sistema proceda a análise.

Depois de fornecer estas informações ao sistema, retorna-se para a tela da AMII (fig. 6.14), selecionando agora a segunda opção,

chamando, a tela "Menu" do Processador de Correções II (fig. 6.16), tendo-se duas opções. A primeira faz a correção de erros, mostrando-os na tela Ações Corretivas (fig. 6.17), e a segunda, apresenta uma análise para cada ferramenta usada, na forma gráfica. Ao selecionar esta opção na tela PCII, é apresentada uma tela que mostra as ferramentas utilizadas. Faz-se então a escolha de uma, sendo apresentado o seu histograma baseado em pré-controle, que mostra o acompanhamento da evolução de uma operação de usinagem associada a um par ferramenta/dimensão.

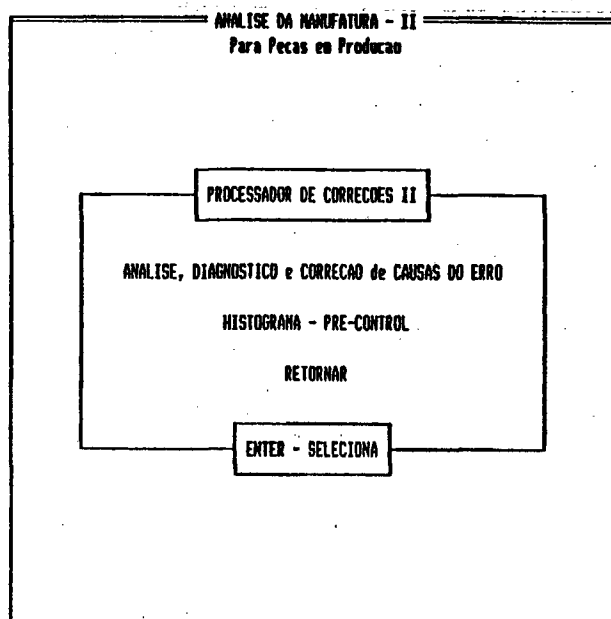


Figura 6.16 - Tela "Menu" do Processador de Correções II (PCII)

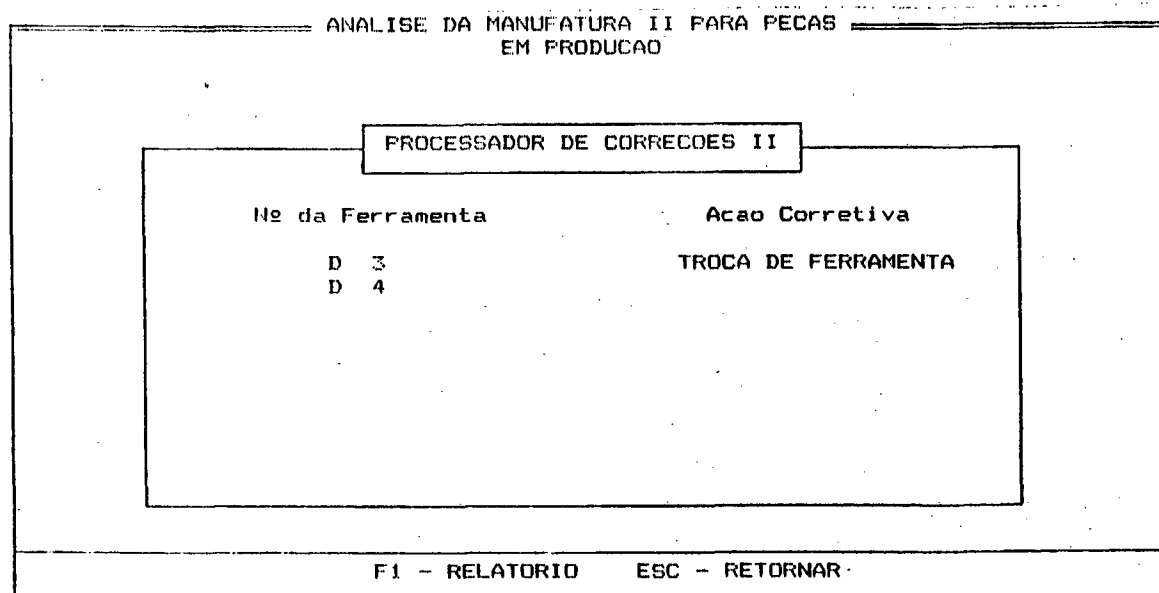


Figura 6.17 - Tela Ações corretivas (AC)

Na sequência, retorna-se à tela AMII (fig. 6.14) e seleciona-se a terceira opção, para efetivar a transferência de dados de ferramenta para o CNC da unidade de fabricação, por meio da tela de Transferência de Dados de Ferramenta, onde o procedimento é o mesmo que o adotado para peças em início de produção, já descrito anteriormente.

Assim, fecha-se a malha de fabricação, realimentando-se o processo de forma automática, mantendo-o sob controle e dentro dos níveis de tolerância estabelecidos, podendo-se dependendo das características do processo/máquina diminuir as tolerâncias de fabricação, melhorando, assim, a qualidade da peça processada.

7. SIMULAÇÃO DE UM CASO TÍPICO

Através da simulação de um caso de complexidade acima da média, demonstra-se a validade dos resultados, o modo de operação e as potencialidades da metodologia e do sistema desenvolvido. A implementação experimental e a sua avaliação de desempenho no chão de fábrica não foram executadas, devido às dificuldades econômicas na condução do projeto CIM (UFSC/CERTI) e às restrições de tempo.

A seguir, são apresentadas todas as fases necessárias para a execução da simulação de um caso para a AMI e AMII.

7.1 UNIDADES DO SISTEMA SIMULADO

A configuração física corrente usada como referência para a simulação é apresentada na figura 7.1. Todos os equipamentos são interligados à unidade de análise e correção de erros (CAQ) via porta serial RS-232C. Esta configuração física é a mais viável de ser implementada para efeito experimental, a fim de avaliar a software/sistema ReQual.

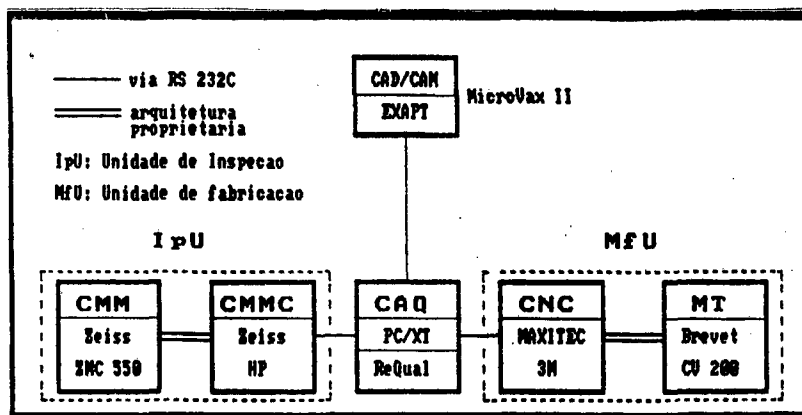


Figura 7.1 – Configuração física corrente do sistema

A programação NC da peça típica é realizada no sistema EXAPT instalado em um MicroVax II. O relatório referente ao programa NC

com comentários gerado pelo sistema EXAPT é armazenado em disco flexível, estando disponível para ser utilizado pela CAQ/ReQual.

Devido à problemas técnicos na utilização da função do software de medição da CMM que controla a gravação do protocolo de medição em formato neutro (ASCII), não foi implementado a função de transferência automática do protocolo de medição no software Requal, isto por não se conhecer a estrutura de dados do protocolo. Estando esta função disponível, seria necessário o desenvolvimento de um pré-processador, para transformar/compatibilizar o formato da estrutura de dados adotado no protocolo de medição para o formato aceito pelo sistema ReQual.

7.2 PEÇA EXEMPLO

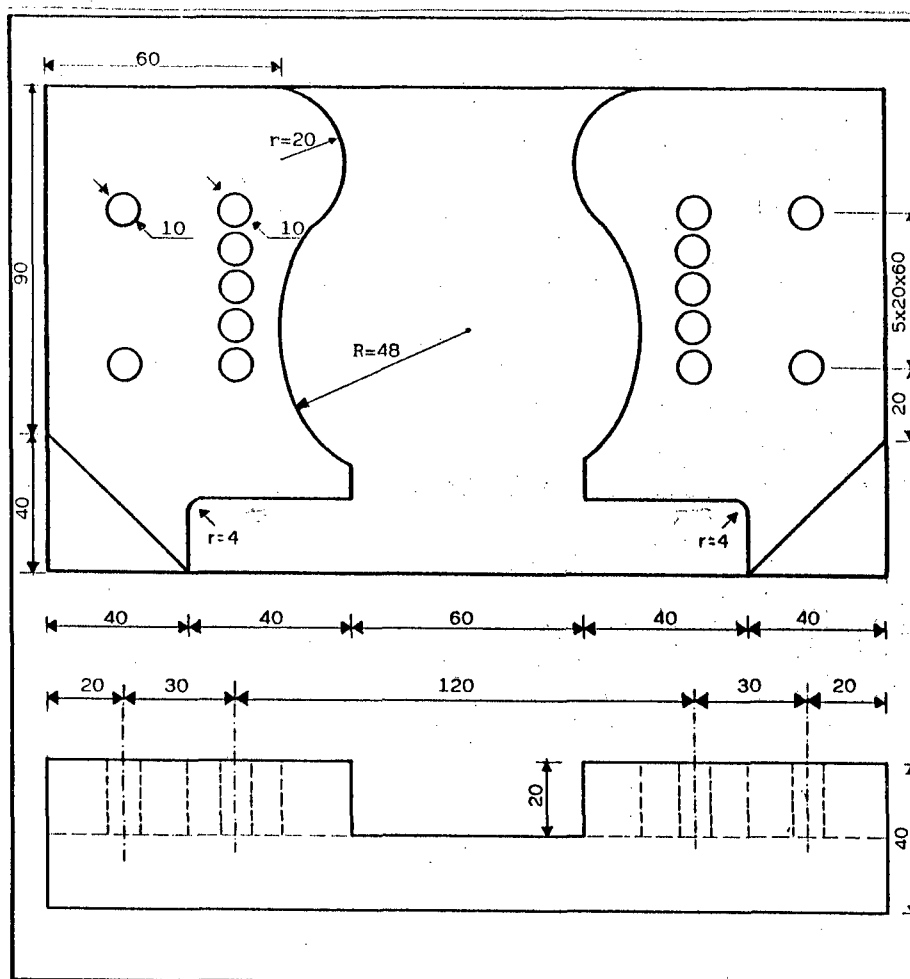


Figura 7.2 - Peça exemplo

O requisito principal para a escolha da peça exemplo (fig. 7.2) é que sua geometria possibilite a utilização das principais declarações (básicas e especiais) de linguagem de alto nível da família APT, interpretáveis/aceitas pelo sistema ReQual, durante a programação NC do processo de fabricação. Assim, a programação NC da peça escolhida deverá apresentar os elementos geométricos (EG's) do tipo ponto, linha, circunferência; declarações do tipo "Patern", "Macro", "Matrix"; sub-rotinas; dados de ferramenta fictícios e reais; entre outros.

7.3 PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO NC DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E INSPEÇÃO (MIPP²)

Em etapa anterior a esta, planejamento de processos /89,95/, são realizadas, comumente, uma série de definições de características importantes para o MIPP², entre as quais têm-se:

- operações e sequência de usinagem;
- dispositivos de fixação;
- superfícies de referência;
- superfícies críticas a serem inspecionadas.

Normalmente, o planejamento da inspeção não é realizado junto com o planejamento de processos. Contudo, recomenda-se fazê-lo em conjunto, para que o trabalho de compatibilização seja viável, consistente e, acima de tudo, racionalizado.

Com estas informações disponíveis na folha de processos, inicia-se o planejamento da programação NC dos processos de fabricação e inspeção. Este, obrigatoriamente em conjunto, para possibilitar a compatibilização da identificação dos elementos geométricos (EG's) que compõem a peça, para os processos de medição e usinagem, respeitando as orientações e recomendações contidas no capítulo 5. Desta forma, define-se como serão realizados os processos de usinagem e medição da peça, podendo-se, assim, executar a programação NC dos dois processos. A figura 7.3 apresenta a peça com a identificação dos EG's referentes a AMI e a figura 7.4 referente a AMII, já estando determinado a localização do zero peça.

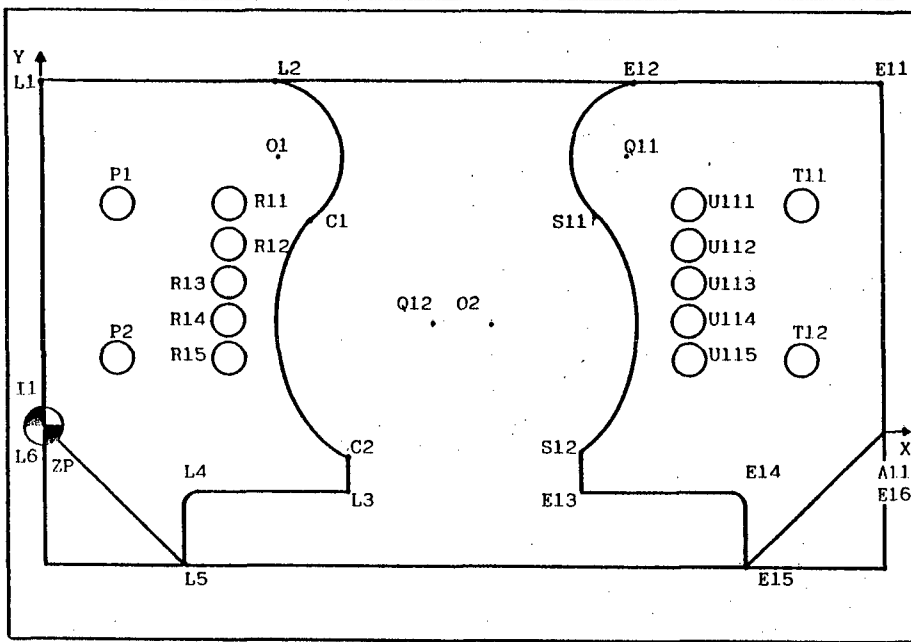


Figura 7.3 - Identificadores utilizados na AMI

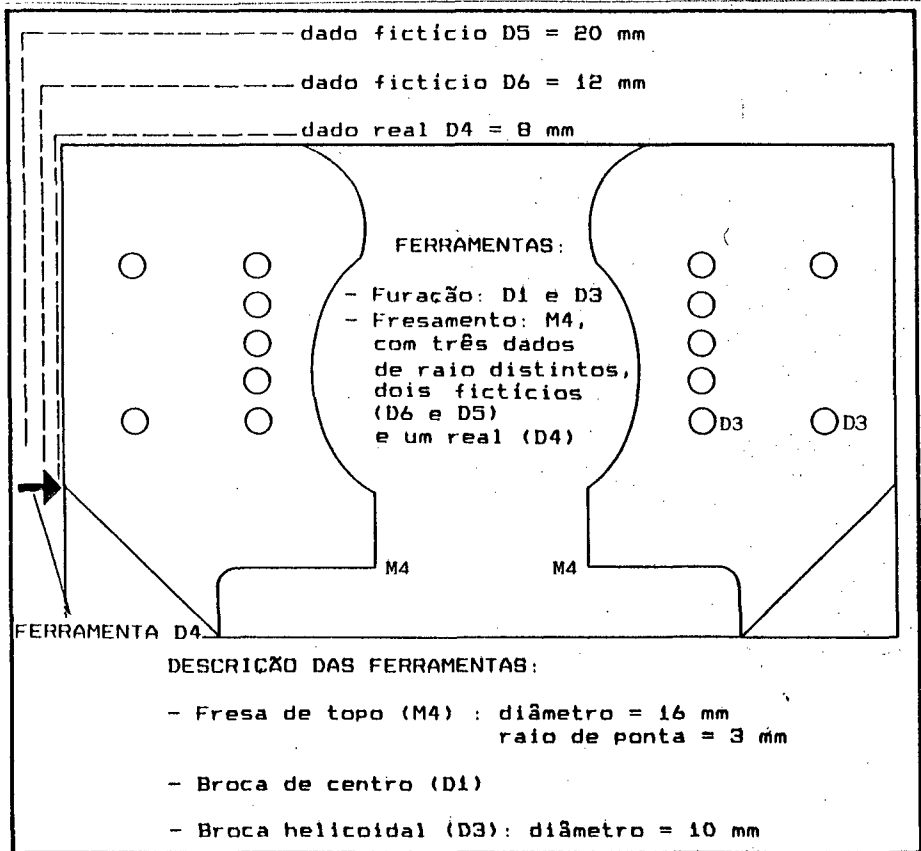


Figura 7.4 - Identificadores utilizados na AMII

7.4 GERAÇÃO DO PROGRAMA NC

A peça é programada em EXAPT, utilizando o pós-processador para o conjunto máquina-ferramenta/comando, EX-CELL/3M /96/. Utilizou-se deste pós-processador por não se dispor de um voltado para o conjunto centro de usinagem/CNC disponível, BREVET/3M.

As declarações da linguagem do sistema EXAPT (fig. 5.9) utilizadas e passíveis de tratamento/correção pelo ReQual são listadas abaixo:

- declarações de definições geométricas (modo de entrada) as mais variadas possíveis, para definições de pontos, linhas, circunferências e planos;
- declaração de "Copy"/espelhamento;
- macros de furação e fresamento;
- "Cutcom" e "Ofstno"
- ciclo fixo;
- programação normal;
- "Pprint"

O programa em EXAPT (fig. 5.9) é processado e o seu resultado (CL File) é submetido ao pós-processador EX-CELL, gerando o programa NC com comentários (fig. 3.11) e o programa NC apenas com o código G.

7.5 PROTOCOLO DE MEDIÇÃO

ANALISE DE TOLERANCIA - ENTRADA MANUAL

Data : 19/04/90

Nome Peça : TIPICA

Numero Peça : 1

Lote : 1

	LTS	REAL	NOMINAL	LTS	LTI	ERRD	EXCEDE
1	P1X	19.85	20.00	0.05	-0.05	-0.15	-0.1
2	P2Z	19.5	20.00	0.5	-0.5	0.5	—
3	R1ZY	50.3	50.00	0.5	-0.5	0.3	+++
4	T11X	194.85	200.00	0.05	-0.05	-0.15	-0.1
5	T12Z	19.5	20.00	0.5	-0.5	0.3	—
6	U11ZY	50.3	50.00	0.5	-0.5	0.3	+++
7	L1X	0.15	0	0.05	-0.05	0.15	0.1
8	O1X	60.2	60.00	0.05	-0.05	0.2	0.15
9	C1X	75.25	75.00	0.05	-0.05	0.25	0.20
10	L4X	-20.25	-20.00	0.05	-0.05	-0.25	-0.20
11	L6Y	0.35	0	0.05	-0.05	0.35	0.30
12	E11X	220.40	220.00	0.05	-0.05	0.4	0.35

F1 - FIM

F2 - PROSSIGUE

ESC - RETORNAR

ANALISE DE TOLERANCIA - ENTRADA MANUAL

Data : 19/04/90

Nome Peça : TIPICA

Numero Peça : 1

Lote : 1

	LTS	REAL	NOMINAL	LTS	LTI	ERRD	EXCEDE
1	O11X	160.35	160.00	0.05	-0.05	0.35	0.30
2	S11X	145.45	145.00	0.05	-0.05	0.45	0.40
3	I1Z	20.15	20.00	0.1	-0.1	0.15	0.5
4	A11Z	20.18	20.00	0.1	-0.1	0.18	0.8
5	TL41	22	20.00	0.1	-0.1	2	1.9
6	TL42	23	20.00	0.1	-0.1	3	2.9
7	TL43	23.5	20.00	0.1	-0.1	3.5	3.4

F1 - FIM

F2 - PROSSIGUE

ESC - RETORNAR

Figura 7.5 - Protocolo de medição para AMI

É apresentado na figura 7.5 uma parte do protocolo de medição referente à AMI, já estando no formato aceito pelo sistema, contendo os dados nominais, de medição e de erros simulados, referentes a inspeção dimensional realizada sobre a peça em início de produção. Como se trata de uma simulação, não é realizada a programação "NC" (dados de controle) da CMM. Em condições normais, esta teria de ser feita pelo método de programação por aprendizagem, na própria máquina.

A figura 7.6 apresenta, como exemplo, seis protocolos de medição para a AMII. A simulação é efetuada para as seis peças em ciclo de produção (peça 1,2,3,4,5 e 6).

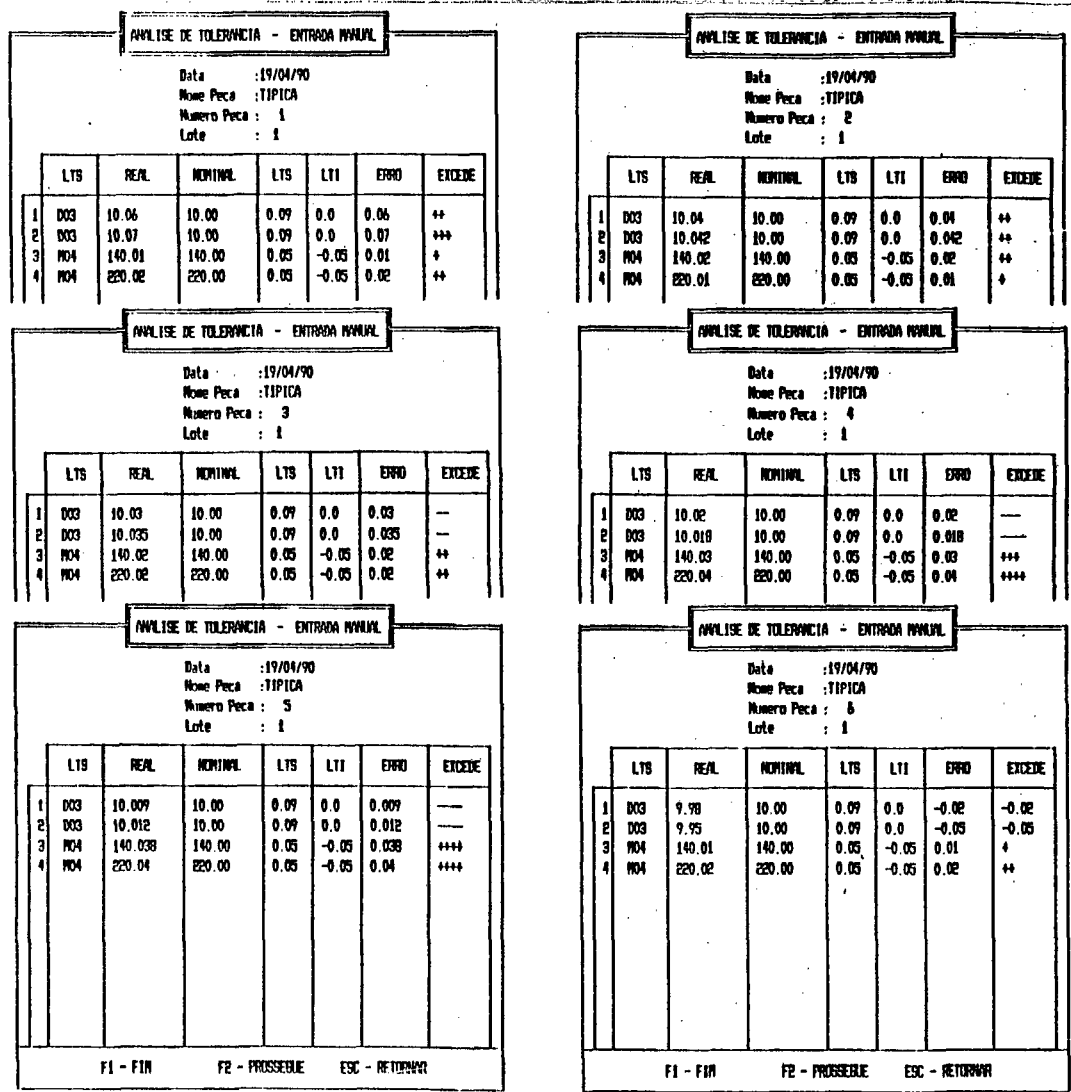


Figura 7.6 - Protocolo de medição para AMII

7.6 CORREÇÕES EFETUADAS NA AMI

O valor dos erros simulados utilizados no protocolo de medição referentes aos diferentes elementos geométricos analisados, permitem a utilização de todas as etapas de correções (etapas de 1 à 12), varrendo-se todas as possibilidades do Processador de Correções I, testando, assim, todas as correções efetuadas sobre os dados NC. Quando a etapa 1 é executada, para determinada coordenada, as etapas seguintes, para esta coordenada não são analisadas, pois o erro já é corrigido de maneira global para todas as etapas, fazendo as correções sobre as coordenadas de definição de zero peça.

A figura 7.7 apresenta dois conjuntos de blocos do programa NC referente à peça exemplo, sendo o primeiro (a) para o programa original (fig. 3.11) e o segundo (b) para o programa NC corrigido. As coordenadas dos elementos geométricos com erro ("L4X", "L6Y" e "A11X"), apresentados na figura 7.7b (linhas sem "*"), são corrigidos de acordo com o erro detectado e a posição ocupada na zona de tolerância, centralizando a dimensão/coordenada corrigida do EG, em relação aos seus afastamentos inferior e superior (fig 4.10).

ANALISE DA MANUFATURA - I

Para Peças em Try-out / Novo Lote

PROCESSADOR DE CORRECOES - I

Nome da peça :TIPICA

No de blocos corrigidos:

Programa NC

* N0940 G03 X76 Y51.051 I34.604 J-27.176 F275	80	C2
* N0950 X69.479 Y28 I37.479 J-23.051	81	C2
* N0960 X84 Y-4.665 I44 J0	81	C2
* N0970 G01 Y-24 F300	82	L3
* N0980 X44	83	L4
* N0990 Y-41.657	84	L5
* N1000 X0 Y-85.657	85	L6
* N1010 G00 Z5	87	
* N1020 X-70 Y-11	146	P7
* N1030 D006	74	P7
* N1040 Z-20	75	
* N1050 X-4	76	
* N1060 Y94	77	L1

F1-UM BLOCO F2-CONJ. DE BLOCOS F3-CONTINUAR PESQUISA ESC-RETORNAR

Figura 7.7a - Conjunto de blocos do programa NC original

ANALISE DA MANUFATURA - I		
Para Peças em Try-out / Novo Lote		
PROCESSADOR DE CORRECOES - I		
Nome da peça :TIPICA	No de blocos corrigidos: 34	
Programa NC		
* N0940 G03 X76 Y51.051 I34.604 J-27.176 F275	80	C2
* N0950 X69.479 Y28 I37.479 J-23.051	81	C2
* N0960 X84 Y-4.665 I44 J0	81	C2
* N0970 G01 Y-24 F300	82	L3
* N0980 X44.25	83	L4
* N0990 Y-41.657	84	L5
* N1000 X0 Y-86	85	L6
* N1010 G00 Z5	87	
* N1020 X-70 Y-11	146	P7
* N1030 D006	74	P7
* N1040 Z-20.15	75	
* N1050 X-4	76	
* N1060 Y94	77	L1
F1-UM BLOCO F2-CONJ. DE BLOCOS F3-CONTINUAR PESQUISA ESC-RETORNAR		

Figura 7.7b - Conjunto de blocos do programa NC corrigido

A figura 7.8 apresenta o programa NC com os dados referentes à correção de zero peça (etapa 1) para a coordenada "X", supondo que a maioria dos erros referentes à coordenada "X" (maior ou igual 75% Eg's) apresentam erros da mesma ordem de grandeza e na mesma direção. O zero peça é definido através de G54.

Listagem de : A:\10\TIPIC.ZP	
X	9993
N10	R71 199.575 R72 02001
N20	G29 27103 R72
N30	N30

Figura 7.8 - Programa NC para correção de zero peça

A figura 7.9 apresenta o programa NC com os dados referentes a correção de comprimento de ferramenta (etapa 2), analisado a partir da coordenada "Z" dos elementos geométricos "TL".

As correções efetuadas para AMI apresentadas nestas figuras demonstram as potencialidades do sistema a nível teórico, esperando-se que, realmente, estas correções sejam produtivas e

efetivas quando da implantação do sistema/metodologia a nível experimental.

Listagem de : A:\IO\TIPIC.TL

% TO

G92 D4 D107.170 P8.000

G92 D5 D107.170 P20.000

G92 D6 D107.170 P12.000

M30

Figura 7.9 - Programa NC para correção de comprimento de ferramenta

7.7 CORREÇÕES EFETUADAS NA AMII

Os dados de entrada complementares, chamados de dados técnicos de produção, são apresentados nas figuras 7.10a e 7.10b, que apresentam os dados de ferramenta (comprimento, raio e dados compartilhados) e o tempo de usinagem, respectivamente. Estes dados são fundamentais para as análises e correções de erros que terão lugar.

ANALISE DA MANUFATURA - II

Para Peças em Produção

ARQUIVO DE DADOS DE FERRAMENTA - ENTRADA MANUAL

Comando : G3H
Máquina F. : Brevet
Nome do arquivo : Tipica

Nº da Ferramenta (D)	Comprimento (mm)	Raio (mm)	Compartilhados
D 3	D 150.00	P 10.00	D
D 4	D 110.00	P 8.00	D
D 5	D 110.00	P 20.00	D 4
D 6	D 110.00	P 12.00	D 4
D	D	P	D
D	D	P	D

F1-GRAVAR F2-PROSSEGUIR F3-DIRETORIO F4-RENOVEAR ESC-RETORNAR

a) dados de ferramenta

ANALISE DA MANUFATURA - II

Para Peças em Produção

Tempo de Usinagem Total para cada Ferramenta - TD

Nº da Ferramenta (D)	TD (min)
D 1	0.5
D 2	0.8
D 3	0.5
D 4	2.3
D	
D	
D	
D	
D	
D	

F1 - FIN F2 - PROSSEGUIR ESC - RETORNAR

b) tempo de usinagem

Figura 7.10 - Dados técnicos de produção

A figura 7.11 apresenta as ações corretivas baseada em técnicas de pré-controle. As ações corretivas referem-se a análise do protocolo de medição das peças 4 e 5, levando em consideração também as peças anteriores (1 à 3). O identificador D03/D03 (elemento geométrico/ferramenta) refere-se à broca helicoidal e o M04/D04,D05,D06 (elemento geométrico/ferramentas real e fictícias) à fresa de topo.

ANALISE DA MANUFATURA II PARA PECAS EM PRODUCAO	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 0 auto; width: 80%;">PROCESSADOR DE CORRECOES II</div>	
Nº da Ferramenta	Acao Corretiva
D 3	
D 4	C = -0,0390
F1 - RELATORIO ESC - RETORNAR	

Figura 7.11 - Tela de ações corretivas baseada nas peças 4 e 5

A figura 7.12 apresenta o histograma que situa, para a ferramenta/EG "D03", o valor do erro dentro da zona de tolerância de acordo com o parâmetro Excede.

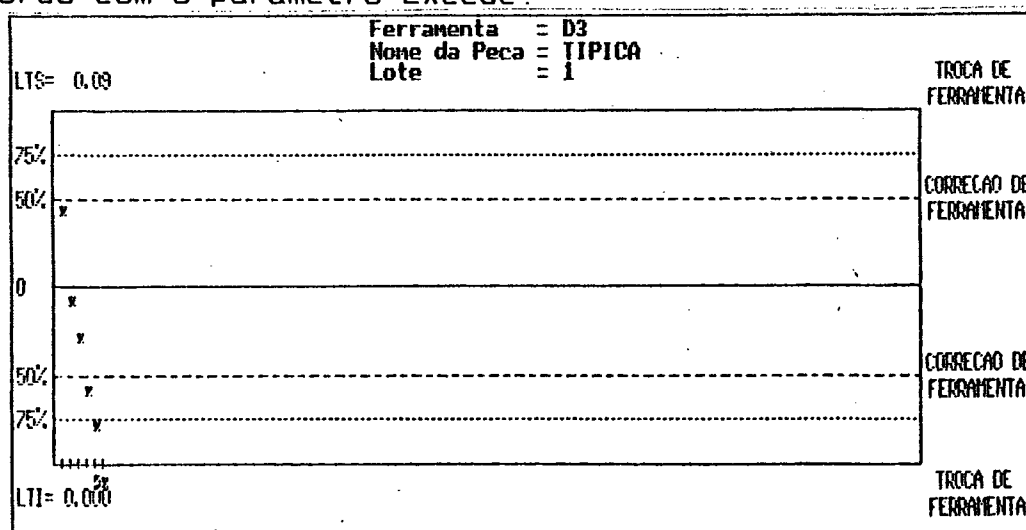


Figura 7.12 - Histograma de pré-controle para ferramenta/EG "D03"

O programa NC com os dados referentes à correção de raio de ferramenta (operações de fresamento) é apresentado na figura 7.13 .

Listagem de : A:\IO\TIPIC.TP

```
% TO
G92 D4 D110.000 P7.961
G92 D5 D110.000 P19.961
G92 D6 D110.000 P11.961
M30
```

Figura 7.13 - Programa NC para correção de raio de ferramenta
(fresa)

Avaliar os reais benefícios da estratégia de correções adotada para a AMII é bem mais crítico que para a AMI. A sua comprovação, tal como como da AMI, só poderá ser realizada a partir da implementação experimental. Em termos teórico a AMII, apesar de mais crítica que a AMI, é plenamente viável como demonstrado nesta simulação.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realimentação automática do processo de fabricação CNC baseada em dados da inspeção geométrica/dimensional utilizando o conceito CLI apresentava, ao iniciar-se este trabalho, um estado de desenvolvimento embrionário não se tendo notícias de nenhum outro desenvolvimento e implementação de um sistema com a filosofia proposta.

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, deparou-se com muitas dificuldades, pois foi necessário partir praticamente do "zero" para se chegar à concepção da metodologia apresentada. Isto, devido à quase inexistência de referências bibliográficas sobre o tema. As disponíveis pouco acrescentavam /5,10/ e alguns autores destacavam os diversos obstáculos, manifestando-se céticos quanto ao seu desenvolvimento /6,14/. Este ceticismo é justificável, devido à complexidade que envolve o problema, principalmente na identificação e correção da real causa de erro do processo, a partir, apenas, dos dados de inspeção dimensional da peça.

Ao longo do trabalho, tomou-se consciência de todas estas dificuldades e após cuidadoso estudo da problemática de caráter multidisciplinar, caracterizou-se a mesma (capítulos 1, 2 e 3) e concebeu-se uma metodologia para realimentação da qualidade, designada por ReQual (capítulo 4), seguida do seu detalhamento (capítulo 5), implementação computacional que gerou o software/metodologia ReQual (capítulo 6) e a simulação de um caso típico, que demonstrou as correções efetuadas e seus aspectos funcionais (capítulo 7), alcançando-se desta forma as metas propostas na definição do trabalho.

Analisando-se, tudo o que foi apresentado para se chegar à concepção final da metodologia ReQual, constata-se que a sua implementação em um empresa exigiria um alto nível organizacional e uma cultura sedimentada com relação às tecnologias modernas de

automação da manufatura, devendo sua utilização ser totalmente dominada pela empresa, ou seja, a empresa já passou ou está passando pela trilogia racionalização/automação/integração.

A nível organizacional as ações são mais críticas, sendo necessária a adoção, e mesmo, a mudança radical de métodos e procedimentos empregados nos níveis 4P e operacional, adequando-os aos requisitos do sistema/metodologia ReQual.

Um outro ponto a ser salientado, refere-se a integração/relacionamento das áreas de Produção, Planejamento e Projeto. Esta é fundamental para a comunicação entre estes três níveis, a fim de viabilizar a metodologia, principalmente a nível de Planejamento e Programação dos Processos de Inspeção e Usinagem.

Apresentado este panorama, pode-se destacar algumas conclusões relevantes referentes, propriamente, ao sistema ReQual e a sua implantação:

- O sistema é expansível, devido à sua concepção modular, facilitando a incorporação de novas opções de correções de erros para outras operações de usinagem;
- Pode ser utilizado com qualquer linguagem da família APT, desde que se faça algumas adaptações na geração dos arquivos necessários para a análise do sistema, apresentando um grau de universalidade elevado;
- Aceita grande parte das declarações, mais comuns, utilizadas na programação APT, não restringindo as potencialidades do sistema APT ou similar;
- As análises e ações corretivas são realizadas em um tempo pequeno, quando comparado a realizada por meios convencionais (manualmente). Por exemplo, 500 correções no programa NC, são realizadas em cerca de 8 minutos em um PC XT. Deste modo, não se inviabiliza a sua implantação em FMC/FMS, atendendo a requisitos de tempo e maximizando a produtividade do sistema de fabricação;
- A estratégia de análise e correção de erros para peças em início de produção é a mais viável em termos de retorno do sistema, por agilizar enormemente o processo de correções;

- A estratégia de análise e correção de erros para peças em ciclo de produção é a mais crítica em termos de resultados, por não se poder avaliar, a nível teórico, como ela irá se comportar quando colocada em prática, e se as ações corretivas realizadas terão, realmente, o efeito desejado;
- A conexão dos equipamentos através da RS232C, como foi realizado, não é o ideal sendo fortemente recomendável a interconexão por meio de LAN;
- O software necessita ser otimizado, no que diz respeito à entrada de dados da análise de tolerância, a qual é realizada, nesta versão, manualmente. Ainda, com relação às entradas manuais, o software deveria ser dotado de rotinas de verificação de consistência de dados de entrada, fazendo críticas e não aceitando dados fornecidos erroneamente, detectando, assim, eventuais erros grosseiros realizados pelo operador.

Para finalizar, são listados, a seguir, sugestões para trabalhos futuros, dentro desta linha de pesquisa:

- Implementação experimental do sistema, a fim de avaliá-lo determinando ganhos reais de produtividade proporcionados;
- Estudo e especificação de um sistema de comunicação, rede local (LAN), para viabilizar a integração da's unidade's de inspeção na célula de fabricação;
- Aumento dos recursos para análise/correções de erros, oferecendo opções de análise também para operações de torneamento e outras operações de fresamento, cavidades e ciclos fixos, por exemplo;
- Implantação a nível de FMC/FMS, onde o sistema atenda a diversas MfU e a vários tipos de peças em processamento, a fim de avaliar a metodologia como um todo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- / 1/ Franck, G.L. Flexible Inspection Systems for Automated Manufacturing; Conf. Automated Inspection and Product Control; 213-224; Junho; 1987.
- / 2/ Ercole, M. The Integrated Flexible Dimensional Inspection; Conf. Automated Inspection and Product Control; 241-251; Junho; 1985.
- / 3/ Moncarz, H. T. Architecture and Principles of the Inspection Workstation; NBSIR 88; 3802; Junho; 1988.
- / 4/ Cardew, A. S. Overview of Automated Inspection and Product Control in Europe; Conf. Automated Inspection and Product Control; 1-12; Junho; 1987.
- / 5/ Van den Berg, B. Closed Loop Inspection of Surfaces in a Computer Integrated Environment; Conf. Automated Inspection and Product Control; 145-156; Junho; 1987.
- / 6/ Beckett, J. Automated Inspection for FMS; Sensor Review; 72-75; abril; 1985.
- / 7/ Pfeifer, T. Measurement and Quality Control Integration in Computer Integrated Manufacturing (CIM); IX COBEM; 1-6; Florianópolis; Novembro; 1987.
- / 8/ Mathias, R. A. Shop Floor Data Monitoring and Processing Requirements for Generative Cutter Path Selection and Machining Rate Optimization; Numerical Control Society's 20th Annual Meeting and Technical Conf. Proc.; 77-88 Abril; 1983.
- / 9/ Flavell, N. L. Error Rate of First Run NC Programs; Numerical Control Society's 20th Annual Meeting and Technical Conf. Proc.; 34-46 Abril; 1983.
- /10/ Veron, M. Intégration du Contrôle Dimensionnel dans un Système Flexible de Production; Ris, R. G.

- Charton, V. Annals of CIRP; vol.37; 485-488; Janeiro 1988.
- /11/ Breyer, H. Integration von Koordinatenmeßgeräten in flexible Fertigungssysteme; Werkstatt und Betrieb; vol. 118; 595-597 Janeiro; 1985.
- /12/ Wik, D. A. Closed Loop Machining - A Key Process in Factory Automation; Numerical Control Society's 21th Annual Meeting and Technical Conf. Proc.; 275-280; Abril; 1984.
- /13/ Society of Manufacturing Engineers Tool and Manufacturing Engineers Handbook; Vol's 1 e 3 - Machining e Inspection; 4a edição; 1983.
- /14/ Hales, A. M. Automated Inspection for Flexible Manufacturing; Manufacturing Systems; Dezembro; 1985.
- /15/ Schaffer, G. Sensors: The Eyes and Ears of CIM; American Machinist; Special Report 756; 109-124; Junho; 1983.
- /16/ Schaffer, G. Integrated QA: Closing the CIM Loop; American Machinist; Special Report 775; 137-147; Abril; 1985.
- /17/ Neumann, H. J. Shopfloor Application of CNC Coordinate Measuring Machines; Werkstatt und Betrieb; volume 117; n.9; 1-14; 1984.
- /18/ Kalpakjian, S. McKee, K. E. Automated Inspection: an Extended View; Conf. Automated Inspection and Product Control; 13-23; Junho; 1987.
- /19/ Mohl, R. Workpiece and Tool Monitoring, Function Checking and Fault Diagnosis in Metal-working Production; Industrial & Production Engineering; 10 Janeiro; 60-64; 1986.
- /20/ TRAUB Torno Automático CNC TRAUB - Série TNS 42/60; Catálogo No.849.553.
- /21/ MAHO - MAHOMAT Vertical Machining Centre for Modern Manufacturing; Prospectos MAHO CNC 432 ; 1989.
- /22/ INDEX Medição de Peças e de Ferramentas nos Tornos CNC; Manual Técnico; Agosto; 1985.

- /23/ Veiga, C. L. N. Medição por Coordenadas em Máquinas-Ferramenta com Comando Numérico - Método Diferencial; Dissertação de Mestrado; UFSC/EMC/LAB METRO; Fevereiro; 1986.
- /24/ Pritschow, G. Sensores de Força e Torque em Máquinas-Ferramenta; Máquinas e Metais; 48-57; Maio; 1989.
- /25/ Majima, T. Monitoração do Processo de Corte com Sensores; Máquinas e Metais; 24-33; Janeiro; 1989.
- /26/ Shiraishi, M. On-line Measurement and Control for the Quality Assurance in Turning; Symposium on IMEKO; Tokyo; 68-73; 1984.
- /27/ Shibata, J.
Chao-Kun K.
Inasaki I. Adaptive Control for Conveyor - Type Belt Grinder; Annals CIRP; vol.29; Janeiro; 1980.
- /28/ Carlisle, R. V. Adaptive Control and the New Manufacturing Disciplines; Numerical Control Society's 20th Annual Meeting and Technical Conf. Proc.; 73-76 Abril; 1983.
- /29/ Shiraishi, M. In-Process Control of Workpieces Dimensional in Turning; Annals CIRP; vol.28; 333-337; Janeiro; 1979.
- /30/ MARPOSS Controle Dimensional Durante o Processo de Retificação; Prospectos; No. A025/85.
- /31/ Tiwari, P. S.
Sharma, K. L. Microprocessor Controlled Pre-, Post- and Instant-Gauging with Corrective Feedback for Automatic Grinding and Cutting Machines in Line Production; Microelectron. Reliab.; Vol. 28; No.2; 229-234; 1988.
- /32/ Kindl, G. F. Automatic In-Process Gauging with Laser Optics; Numerical Control Society's 20th Annual Meeting and Technical Conf. Proc.; 135-137; Abril; 1983.
- /33/ Lundholm, T
Yngen, M
Lindstron, B Advanced Process Monitoring - A Major Towards Adaptive Control; Robotics & Computer - Integrated Manuf.; Vol. 4; No.3/4; 413-421; 1988.
- /34/ Altintas, Y. In-Process Detection of Tool Breakages

- Using Time Series Monitoring of Cutting Forces;
Int. J. Mach. Tools Manufact.; Vol.28;
No.8; 157-172; 1988.
- /35/ Uehara, K.
Kiyosawa, F.
Takeshita, H. Automatic Tool Wear Monitoring in NC Turning;
Annals CIRP; Vol. 28; Janeiro; 39-42;
1979.
- /36/ Hayashi, S. R.
Thomas, C. E.
Wildes, D. G. Tool Break Detection by Monitoring Ultrasonic Vibrations;
Annals CIRP; Vol. 37; Janeiro; 61-64;
1988.
- /37/ Ueda, K.
Sugita, T. In-Process Proof Testing of Cutting Tools in Interrupted Turning;
Annals CIRP; Vol. 37; Janeiro; 65-68;
1988.
- /38/ Raiston, P. A. S.
Ward, T. L.
Stottman, D. J. C. Computer Obsever for In-Process Measurement of Lathe Tool Wear;
Computers Ind. Engn.; Vol. 15; 217-222;
1988.
- /39/ Monostori, L. New Trends in Machine Tool Monitoring and Diagnostics;
Robotics & Computer - Integrated Manuf.;
Vol. 4; No.3/4; 457-464; 1988.
- /40/ Btemmer, C.E. Ferramentas de Corte;
Florianópolis; Ed. da UFSC; 1987.
- /41/ Rocco, F. O. O Uso de Sistemas de Medição em Processo na Ferramentaria;
Máquinas e Metais; 38-45; Maio; 1989.
- /42/ Heller Centros de Usinagem Horizontais - BEA;
Prospectos BEA; uni-Pro 80 e Heller.
- /43/ LABMETRO Instrumentação para Controle Dimensional
Apostila Curso LABMETRO/CERTI; CC - 039;
Capítulo 11; UFSC; 1989.
- /44/ INDEX Medição Externa;
Informações Elétricas; Setembro; 1986.
- /45/ MAHR - Feinprüf Millitron - R9030 - SPC Mebrechner zur Mebwerterfassung an Einzelmebplatzen in Fertigung und Qualitätskontrolle;
Prospectos; 3751952; Outubro; 1986.
- /46/ Sotuyo, J. C. Automatização do Controle Estatístico da Qualidade Dimensional nos Processos de Fabricação Mecânica;
Dissertação de Mestrado; LABMETRO/UFSC;
Florianópolis; Agosto; 1987.

- /47/ Schaffer, G. Statistical Quality Control;
American Machinist; Special Report 762;
97-108; Abril; 1984.
- /48/ Hosni, Y. A. Quality Control & Inspection - Knowledge
Elshennawy, A. K. -Based Quality Control System;
Computers Ind. Engng.; VOL. 15; 331-337;
1988.
- /49/ Traver, R. W. Pre-Control - A Good Alternative to X-R
Charts;
Quality Progress; 11-14; Setembro; 1985.
- /50/ Yang, H. H. Optimal Control of the Grinding Process
Yang, G. P. on the Filtering and Prediction Theory;
Liu, M. Y. Annals CIRP; Vol.32/1; 335-338; 1983.
- /51/ Sata, T. A Proposal of the Multilayered Control
Matsushima, K. of Machine Tools for Fully Automated
Machining Operations;
Annals United Vollaarde; W. Nations;
Dresden; 173-181; Setembro; 1982.
- /52/ Hopp, T. H. A Hierarchical Model-Based Control
Lau, K. C. System for Inspection;
Special Technical Testing Publication
862; NBS; 169-187; 1985.
- /53/ Fischer, T. Prozeßnahe Meßtechnik für die
Herrmann, J. automatisierte Fertigung;
& outros Industrie anzeiger; Nr.56; V.13.7;
113-119; 1984.
- /54/ Alexander, S. M. The Application of Expert System to
Manufacturing Process Control;
Computers Ind. Engng.; VOL. 12; 307-314;
1987.
- /55/ Bauer, E. Arbeitsgenauigkeit in der Maschine
Pittler, G. B. beherrschen;
& outros Industrie anzeiger; Nr.56; V.13.7;
119-128; 1984.
- /56/ Valentina, L. V. O. Automatização de Ensaios Geométrico com
Laser de Alinhamento;
Dissertação de Mestrado; UFSC/EMC/LAB
METRO; Fevereiro; 1986.
- /57/ Venugopal, R. Thermal Effects on the Accuracy of
Barassh, M. Numerically Controlled Machine Tools;
Anais do CIRP; vol. 35; 255-258; Janeiro;
1986.
- /58/ Weingaertner, W. L. Usinagem de Ultraprecisão: um Desafio pa-
ra a Tecnologia de Fabricação Brasileira
Boletim SOBRACON; n.43; 46-54; 1989.

- /59/ Wolak, J. Quality in Automation; Quality; outubro; 1-5; 1989 (reprinted).
- /60/ Zhed, O. V. Comparative Analysis of Methods for Correction of Machining Dimensions on Machines with Numerical Programme Control Systemns; Soviet Engineering Reserach; vol. 7; n.1; 52-54; 1987.
- /61/ Silva, A. D. Ensaios Geométricos de Peças e Máquinas Uma Metodologia Automatizada; Dissertação de Mestrado; UFSC/EMC/LAB METRO; Fevereiro; 1984.
- /62/ Ramusino, F. C. Novos Sistemas para Eliminar Erros em Máquinas-ferramenta; Máquinas e Metais; Janeiro; 16-23; 1989.
- /63/ Gavin, R. Implementing Error Compensation on Machine Tools; Kenneth, Y. Southern Manufacturing Technology Conference; 131-145; 2-4 maio; 1989.
- /64/ Busch, K. Numerical Error-Correction of a Coordinate Measuring Machine; Kunzmann, H. Proceedings of ISMQC in Production-IMEKO Waeldele, F. Tokyo, 284-288; 1984.
- /65/ Rozenfeld, H. Programação de Máquinas CN com uma Linguagem Universal; Máquinas e Metais; vol. 286; 38-48; Novembro; 1989.
- /66/ Groover, M. P. Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing; Prentice-Hall, Inc; Englewood Cliffs; New Jersey; 1987; ISBN 0-13-054652-6025.
- /67/ Knorr, A. A. Aplicações de um Sistema CAD/CAM para Máquinas CN (Conceitos Básicos); 6 Seminário de Comando Numérico no Brasil; SOBRACOM; 209-229; Agosto; 1986.
- /68/ Queiroz, A. A. Cenário da Programação CN - Da Programação Manual ao CAD/CAM; Stemmer, C. E. Sexto Seminário de Comando Numérico no Brasil; SOBRACOM; 01.1-22; Agosto; 1986.
- /69/ APT APT Part Programing; MacGraw-Hill; Book Company; 1967.
- /70/ EXAPT Basic Exapt - Exapt Manual de Programação (Aachen - Tradução); Univ. de Aachen (RFA); Janeiro; 1972.
- /71/ Espinosa, J. E. J. Um Sistema Gráfico Interativo para Matrizes de Solado Injetado;

- Dissertação de Mestrado; UFSC/EMC/GRUCON
Dezembro; 1989.
- /72/ Stanislawski, M. P. The One-Step Process;
Numerical Control Society's 20th Annual
Meeting and Technical Conf. Proc.; 202-
220; Abril; 1983.
- /73/ Queiroz, A. A. MDI Data Preparation Numerically Contro-
lled Milling Machines;
Tese de Doutorado; Loughborough Univer-
sity of Technology; Inglaterra; Dezembro;
1983.
- /74/ Subramanian, M. L. CLFile Manipulator;
Meeting and Technical Conf. Proc.; 249-
263; Abril; 1983.
- /75/ Labmetro Máquinas de Medir por Coordenadas: Medi-
ção, Qualificação e Automação;
Apostila Curso LABMETRO/CERTI; CC - 032;
Capítulo 5; UFSC; 1989.
- /76/ Zeiss CNC Coordinate Measuring Machines - Soft
ware;
Prospectos Software-Zeiss; 60-20-035-e.
- /77/ Neumann, H. J. The Effect of Measurement uncertainty as
a Factor in Manufacturing Tolerances;
Qualitat und zuverlassigkeit; vol. 30;
n. 5; 1985; Reprinted Carl Zeiss.
- /78/ Pfeifer, T. Introdução à Técnica de Medição por
Coordenadas;
Colóquio: Técnica Avançadas de Medição
por Coordenadas; Fpolis; Dezembro; 1987.
- /79/ Goelze, H. Integration of Measurement Controlling
Systems into Flexible Production Lines;
Anais IMEKO - Symposium Dimensional
Metrology in Production and Quality
Control; 205-214; 20-22 setembro;
Aachen; 1989.
- /80/ Maxitec Manual de Programação- Sistema 3M;
Manual Técnico Maxitec, 1986.
- /81/ Perrelli, P. T. A Experiência de uma Grande Empresa na
Introdução do CN;
Máquinas e Metais; 20-27; Junho; 83.
- /82/ Zeiss DATACOM 300 - Computer Communication
Program and Data Interface;
Instruções de Operações; Agosto; 1988.
- /83/ Marposs LS38 - Medidor programável e Analizador
Estatístico;
Prospectos LS38; 1987.

- /84/ Sprow, E. E. Don't Leave Home-position Without One! Tooling & Production; 61-66; Fevereiro; 1985.
- /85/ Weingaertner, W. L. Processos de Fabricação I; Apostila do curso da Pós-graduação; 1º período; 1989.
- /86/ Boehs, L. Influência do Sulfeto de Manganês na Usinabilidade do Ferro Fundido Maleável Preto Ferrítico; Dissertação de Mestrado; UFSC/EMC/Usimaq Abril; 1979.
- /87/ Venkatesh, V. C. Satchithanandam, M. A Discussion on Tool Life Criteria and Total Failure Causes; Anais do CIRP; Vol. 29; Janeiro; 19-22; 1980.
- /88/ Mendes, M. J. Comunicação Fabril e o Projeto Map/Top; Curso IV EBAI; Buenos Aires; 1989.
- /89/ Rosa, J. M. D. Uma Contribuição para a Integração CAD/CAPP; Dissertação de Mestrado; UFSC/EMC/GRUCON Outubro; 1989.
- /90/ Stiles, E. M. Engineering the 1990s Inspection Function; Quality Progress; 70-71; Novembro; 1987.
- /91/ Zeiss Manual UMESS 300; Instruções de Operações; Agosto; 1989.
- /92/ Agostinho, O. L. Rodrigues, A. C. S. Lirane, J. Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões; Editora Edgard Blucher LTDA; CDD-6710212 São Paulo; 1977.
- /93/ Horne, D. Artificial Expertise Process Control; Mechanical Engineering; 40-44; Março; 1988.
- /94/ Hisatomi, F. Álvares, A. J. Sistema de Realimentação da Qualidade-ReQual; Manual de Referências Técnicas; PL-079; CERTI; Florianópolis; Abril; 1990.
- /95/ Ew, A. N. O Planejamento do Processo Auxiliado por Computador Aplicado à Operações de Furação; Dissertação de Mestrado; UFSC/EMC/GRUCON Junho; 1989.
- /96/ GRUCON Manual Técnico do Pós-Processador MAX3M; Manual Técnico GRUCON, 1990.